

Patric Grauberger

**EnhanCE Modelling – Methodenschulung zur
Vermittlung und Erforschung von qualitativer
Modellbildung mit dem Contact and Channel
Approach**

EnhanCE Modelling – method training for teaching
and researching qualitative modelling with the
Contact and Channel Approach

Band 151

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Copyright: IPEK • Institut für Produktentwicklung, 2022
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

EnhanCE Modelling – Methodenschulung zur Vermittlung und Erforschung von qualitativer Modellbildung mit dem Contact and Channel Approach

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Patric Grauberger

Tag der mündlichen Prüfung:	28.03.2022
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mirko Meboldt

Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird 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 seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

Vorwort zu Band 151

Spätestens seit Herbert Stachowiak 1973 seine allgemeine Modelltheorie formuliert hat, wissen wir:

„Alle Erkenntnis ist Erkenntnis in Modellen oder durch Modelle und jegliche Weltbewegung überhaupt bedarf des Mediums Modell.“

Immer dann, wenn Erkenntnisse in komplizierten Zusammenhängen gewonnen werden sollen, spielt die Modellbildung eine besonders wichtige Rolle.

In der Konstruktion gilt es, Zusammenhänge zwischen der Produktgestalt und der durch sie erfüllten Funktion vorzudenken und herauszuarbeiten. Die dazu notwendige mentale Modellbildung ist sowohl schwierig auszuführen als auch schwierig zu erforschen. Um qualitative Modelle zielführend entwickeln zu können, sind Erkenntnisse zu den Erfolgskriterien, Anwendbarkeit und Nutzen, später auch zur Akzeptanz notwendig. Diese Erkenntnisse könnten durch geeignete Studien gewonnen werden. In der Produktentwicklungsforschung gibt es jedoch bisher wenig Hilfsmittel zu Studiendesign oder Datenerfassung. Ein Ansatz zum Aufbau qualitativer Modelle ist der Contact & Channel Ansatz.

In der vorliegenden Forschungsarbeit widmet sich Herr M. Sc. Patric Grauberger einer extrem anspruchsvollen Thematik: Der Erforschung des Vorgehens bei der Modellbildung in der Gestaltung. Da die von ihm erforschte qualitative Modellbildung zunächst als mentaler Prozess im Kopf des Konstrukteurs erfolgt, ist es extrem schwierig, diese Fragestellung überhaupt erforschbar zu machen. Ihm gelingt dies durch zwei Stimuli, die über zwei von ihm ausgewählte und zum Teil konstruierte Systeme, dem Rasthaken und der Kartuschenpresse möglich werden. Sehr gekonnt erkennt Patric Grauberger, dass die Erforschung einer methodischen Unterstützung bei der Modellbildung nur erfolgen kann, wenn sichergestellt wird, dass die Modellbildungsmethode überhaupt verstanden und auch angewandt wird. Ist dies nicht sichergestellt, können auch die Modellbildungsergebnisse nicht auf die Wirkung der Methode zurückgeführt werden. Deshalb entwickelt Patric Grauberger zunächst eine Schulungsmethode EnhanCE Modelling, die neben der Vermittlung der Methode und der Überprüfung, inwieweit die Methode von den Probanden angewandt werden kann, auch als Forschungsplattform für die Erforschung des Vorgehens bei der Modellbildung dient.

Patric Grauberger entwickelt EnhanCE Modelling als Methodenschulung zur Vermittlung qualitativer Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz. Auf Basis der Schulung erforscht er anschließend, welchen Einfluss der durch EnhanCE Modelling vermittelte C&C²-Ansatz

auf das Systemverständnis in Fragestellungen der Gestaltung hat. Mit diesem Experiment werden erstmalig statistisch signifikante Aussagen zum Einfluss der Modellbildung von Gestalt-Funktions-Zusammenhängen mit dem C&C²-Ansatz auf das Systemverständnis von Produktentwicklung möglich.

März 2022

Sven Matthiesen

Kurzfassung

Der Aufbau von Systemverständnis durch Modellbildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen (GFZ) ist eine zentrale Tätigkeit in der Gestaltung. Er geschieht zunächst mental und läuft oft unbewusst ab, d.h. erfahrene ProduktentwicklerInnen wissen, dass eine bestimmte Gestalt die gewünschte Funktion erfüllt, aber können nicht genau sagen, warum. Dieses mentale Modell kann unbemerkt Fehler und Lücken beinhalten (Meboldt et al. 2012). Werden diese nicht aufgedeckt, besteht das Risiko, die gewünschten Funktionen nicht, oder nicht ausreichend zu erfüllen. Im Aufdecken dieser Fehler und Lücken können qualitative Modelle wie beispielsweise Contact and Channel Modelle oder Wirkraummodelle unterstützen. Durch sie können mentale Modelle früh dokumentiert und anderen ProduktentwicklerInnen zugänglich gemacht werden. Die Anwendung dieser qualitativen Modelle ist jedoch eine Herausforderung, weshalb sie selten genutzt werden und ihr Einfluss auf das Systemverständnis von ProduktentwicklerInnen in der Gestaltung unklar ist.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von EnhanCE Modelling¹ als Methodenschulung zur Vermittlung und Erforschung von qualitativen Modellbildung mit dem C&C²-Ansatzes. Als Basis der Entwicklung dient eine Analyse von Anwendungen des C&C²-Ansatzes und der darin bestehenden Herausforderungen. Das auf Basis dieser Analyse entwickelte EnhanCE Modelling beinhaltet drei kontextspezifische Schulungsvarianten, mit denen der C&C²-Ansatz und die in ihm vorhandene Modellbildungsmethode vermittelt wird. Diese Schulungsvarianten ermöglichen zudem durch integrierte Anwendungsfälle die Erforschung der Erfolgsfaktoren Anwendbarkeit und Nutzen der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz. Die Untersuchung der Anwendbarkeit zeigt, dass der C&C²-Ansatz durch EnhanCE Modelling so vermittelt werden kann, dass er auch ohne Vorkenntnisse zur Modellbildung von GFZ angewandt werden kann. Mit der so sichergestellten Anwendbarkeit kann nun erstmalig der Nutzen der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz untersucht werden.

In der Validierungsstudie dieser Arbeit wird der Einfluss des durch EnhanCE Modelling vermittelten C&C²-Ansatzes auf das Systemverständnis in Fragestellungen der Gestaltung experimentell geprüft. Mit diesem Experiment werden erstmalig statistisch signifikante Aussagen zum Einfluss der Modellbildung von GFZ mit dem C&C²-Ansatz auf das Systemverständnis von ProduktentwicklerInnen möglich.

¹ EnhanCE Modelling = Engineering training with hands on method application in Context specific Early Modelling – zu Deutsch: Schulung für Ingenieure mit praktischer Methodenanwendung in kontextspezifischer früh einsetzbarer Modellbildung

Abstract

The development of system understanding through modelling of embodiment function relations (EFR) is a central activity in embodiment design. It happens mentally at first and often unconsciously, i.e. experienced product developers know that a certain embodiment fulfils the function, but cannot say exactly why. This mental model can contain unnoticed errors and gaps (Meboldt et al. 2012). If these are not uncovered, there is a risk of not sufficiently fulfilling the desired functions, or not fulfilling them at all. Qualitative models such as contact and channel models or working space models can support in uncovering these errors and gaps. They can be used to document mental models at an early stage and make them accessible to other product developers. However, the applicability of these qualitative models is a challenge, which is why they are rarely used and their influence on the system understanding of product developers in embodiment design is unclear.

The aim of this thesis is the development of EnhanceCE Modelling as method training for teaching and researching of qualitative modelling with the C&C²-Approach. The development is based on an analysis of applications of the C&C²-Approach and identified challenges. The EnhanceCE Modelling developed on the basis of this analysis includes three context-specific training courses on the C&C²-Approach. These training variants also enable investigations of the success factors applicability and usefulness of modelling with the C&C²-Approach through integrated use cases. A subsequent investigation of the applicability shows that the C&C²-Approach can be applied to the modelling of EFR through EnhanceCE Modelling even without prior knowledge. With the applicability thus ensured, the usefulness of modelling with the C&C²-Approach can now be investigated for the first time.

In the validation study of this thesis, the influence of the C&C²-Approach taught through EnhanceCE Modelling on the understanding of systems in questions of embodiment design is tested experimentally. This experiment makes it possible for the first time to make statistically significant statements about the influence of the modelling of EFR with the C&C²-Approach on the system understanding of product developers.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing Sven Matthiesen der mir neben der wissenschaftlichen Betreuung große Freiräume für die Forschung auf diesem Themengebiet ermöglichte. Dein unermüdlicher Einsatz und die Begeisterung für das Thema Systemverständnis und Modellbildung gaben mir viele Möglichkeiten, Forschungsansätze auszuprobieren, weiterzuentwickeln und bei Schwierigkeiten hattest du immer gute Ideen zur Lösung.

Für die Übernahme des Korreferats bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mirko Meboldt. Bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen bedanke ich mich für die tolle Zeit und Atmosphäre, es hat viel Spaß gemacht, mit euch allen zusammenzuarbeiten. Meinen Kollegen vom pmd der TU Darmstadt möchte ich für die Teilnahme an meiner Validierungsstudie danken. Auch herzlichen Dank an Sven Vogel für die gemeinsame Durchführung und gegenseitige Unterstützung in unseren Validierungsstudien.

Ein besonderer Dank geht an meinen Gruppenleiter und Oberingenieur Thomas Nelius. Die Diskussionen mit dir zur Qualitätssicherung meiner Forschung haben mich forschungsseitig und auch persönlich stark weitergebracht. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Matthias Eisenmann. Ohne deine vielen guten Ideen zur Methodvalidierung, das kontinuierliche Hinterfragen und Prüfen aller Elemente aber auch die Motivation in schwierigen Phasen wäre meine Validierungsstudie in dieser Form nicht möglich gewesen. Auch bei Frank Bremer möchte ich mich herzlich bedanken. Die vielen erfolgreichen gemeinsamen Forschungsprojekte zur Modellbildung haben mir viel Spaß gemacht und deine Unterstützung in schwierigen Projektphasen war entscheidend dafür, dass meine Promotion diesen Weg nehmen konnte.

Zum Abschluss noch einen ganz herzlichen Dank an meine Frau Susa, ohne die das gesamte Unterfangen nicht möglich gewesen wäre. Besonders die letzten anderthalb Jahre hast du mir wirklich den Rücken frei gehalten. Und natürlich bedanke ich mich auch bei unseren Kindern, die doch ziemlich viel von meiner Arbeit mitbekommen und die Prioritäten des Lebens immer wieder dahin verschieben, wo sie hingehören.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Danksagung	v
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Struktur der Arbeit	3
2 Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1 Die Gestaltung in der Produktentwicklung	6
2.1.1 Einordnung der Gestaltung in Prozesse der Produktentwicklung	6
2.1.2 Elemente und Aktivitäten in der Gestaltung	7
2.2 Modelle in der Gestaltung	9
2.2.1 Begrenzte Abbildungsmöglichkeiten des Originals	9
2.2.2 Lücken und Fehler durch Verkürzung	11
2.2.3 Zweckentfremdung durch unklare Grenzen	12
2.2.4 Zusammenfassung zu Modellen in der Gestaltung	12
2.3 Modelle zur Abbildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen	13
2.3.1 Konzeptionierung	17
2.3.2 Produktdefinition	18
2.3.3 Wissensverwaltung	20
2.3.4 Erkenntnisgewinn	21
2.3.5 Zusammenfassung zu Modellen in der Gestaltung	22
2.4 Der Contact and Channel Approach	23
2.4.1 Kernelemente und Grundhypothesen	24
2.4.2 Neben- und Strukturelemente	27
2.4.3 Zustandsbetrachtung – C&C ² -Sequenzmodell	28

2.4.4	Zusammenfassung und Forschungsbedarf im C&C ² -Ansatz.....	29
2.5	Modellbildungsmethoden der Gestaltung	31
2.5.1	Relevanz der Modellbildung in der Gestaltung	31
2.5.2	Modellbildungsmethoden	31
2.5.3	Modellbildung mit dem C&C ² -Ansatz.....	33
2.5.4	Zusammenfassung zu Modellbildungsmethoden der Gestaltung	36
2.6	Vermittlung von Modellen und Methoden – Erkenntnisse der Bildungsforschung	36
2.6.1	Didaktische Konzepte	37
2.6.2	Einflussfaktoren auf den Lernerfolg.....	38
2.7	Validierung von Modellbildungsmethoden.....	39
2.7.1	Herausforderungen der Methodenvvalidierung	39
2.7.2	Vorgehensmodelle der Produktentwicklungsforschung	40
2.7.3	Studiendesigns der Produktentwicklungsforschung	42
2.7.4	Validierungsstudien zum C&C ² -Ansatz	45
2.8	Zusammenfassung des Stands der Forschung.....	47
3	Motivation und Zielsetzung	49
3.1	Motivation	49
3.2	Zielsetzung und Forschungsdesign	50
4	Analyse der Modellbildung von GFZ mit dem C&C²-Ansatz	53
4.1	Anwendung des C&C ² -Ansatz in zwei Fallstudien	54
4.1.1	Studiendesign	54
4.1.2	Ergebnisse.....	55
4.1.3	Diskussion	56
4.2	Literaturbasierte Analyse zum C&C ² -Ansatz	57
4.2.1	Studiendesign	57
4.2.2	Ergebnisse.....	58
4.2.3	Diskussion	61
4.3	Projektanalyse zum C&C ² -Ansatz.....	63
4.3.1	Studiendesign	63

4.3.2	Ergebnisse.....	67
4.3.3	Diskussion	72
4.4	Zusammenfassung der Analyse	74
5	EnhanCE Modelling – Entwicklung der Methodenschulung	77
5.1	Studiendesign der Entwicklung von EnhanCE Modelling.....	79
5.2	Ergebnisse – Konzeptionierung.....	82
5.2.1	Systeme in den Praxisteilen der Modellbildung.....	86
5.3	Ergebnisse – Situationsanalyse.....	89
5.3.1	Schwachstellen aus der Freitextfrage der Evaluation	89
5.3.2	Analyse der inhaltlichen Struktur	90
5.4	Ergebnisse – Optimierung	91
5.5	Ableitung von Schulungsvarianten zur Kontextanpassung des EnhanCE Modelling	95
5.5.1	Die Grundlagenschulung	98
5.5.2	Die Anwendungsschulung	100
5.5.3	Die Syntheseschulung.....	102
5.6	Ergebnisse – Evaluation der Anwendungsschulung	106
5.7	Zwischenfazit – Entwicklung des EnhanCE Modelling.....	111
5.8	Vermittelte Modellbildung durch EnhanCE Modelling – Untersuchung der Anwendbarkeit.....	112
5.8.1	Anwendbarkeit – Stufe 1 Anwendungsschulung.....	113
5.8.2	Anwendbarkeit – Stufe 2 Grundlagenschulung	118
5.9	Zusammenfassung der Entwicklung des EnhanCE Modelling.....	121
6	Validierungsstudie – Systemverständnis durch EnhanCE Modelling	123
6.1	Hypothesen der Studie und Operationalisierung der Messgrößen.....	124
6.2	Studiendesign der Validierungsstudie.....	125
6.2.1	Operationalisierung und Messung der Variablen	125
6.2.2	Untersuchungsumgebung und Studienablauf	127
6.2.3	Studienteilnehmer.....	136
6.2.4	Datenerfassung und -analyse	137
6.3	Ergebnisse der Validierungsstudie	137

6.3.1	Untersuchung auf Systemebene	137
6.3.2	Untersuchung der Detailebene - funktionsrelevante Zustände und funktionskritische Bereiche	141
6.4	Diskussion der Validierungsstudie	144
6.5	Zusammenfassung der Validierungsstudie	146
7	Diskussion	149
8	Zusammenfassung und Ausblick	155
	Literaturverzeichnis	I
	Glossar.....	XXIII
	Anhang A.....	XXV
	Anhang B.....	XXIX
	Anhang C.....	XXXI
	Vollständige Liste der eigenen (wissenschaftlichen) Publikationen.....	XXXIII
	Lebenslauf.....	XXXVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Struktur der Forschungsarbeit.....	3
Abbildung 2-1:	Übersicht des Stands der Forschung	5
Abbildung 2-2:	Framework von Produktmodellen in der Gestaltung	14
Abbildung 2-3:	Tabelle von Produktmodellen in der Gestaltung	15
Abbildung 2-4:	Übersicht des C&C ² -Ansatzes.....	25
Abbildung 2-5:	Darstellung von Parametern in einem C&C ² -Modell einer Keilsicherungsscheibe (vgl. auch Kapitel 5.2.1) angelehnt an eine gemeinsame Ausarbeitung im Rahmen der Abschlussarbeit Skowaisa (2020)	27
Abbildung 2-6:	Struktur der Elemente des C&C ² -Ansatz	28
Abbildung 2-7:	Elemente und Aspekte des C&C ² -Ansatzes	30
Abbildung 2-8:	Vorgehen zur Bildung von C&C ² -Modellen in der Analyse	33
Abbildung 2-9:	Vorgehen zur Bildung von C&C ² -Modellen in der Synthese	35
Abbildung 4-1:	Übersicht der Analyse-Aktivität der Forschungsarbeit	53
Abbildung 4-2:	C&C ² -Sequenzmodell als Basis für mathematische Modellbildung	55
Abbildung 4-3:	Detail eines C&C ² -Modells mit Parametern	56
Abbildung 4-4:	Übersicht der identifizierten Publikationen zu Anwendungen des C&C ² -Ansatzes	59
Abbildung 4-5:	Übersicht des pulvergetriebenen Power-Tools	60
Abbildung 4-6:	Analyse logischer Zustände des pulvergetriebenen Power-Tools mit dem C&C ² -Ansatz	61
Abbildung 4-7:	Struktur des Fragebogens nach dem MoSim Schema	65
Abbildung 4-8:	Bewertung der Techniken zum C&C ² -Ansatz	68
Abbildung 4-9:	Bewertung der C&C ² -Elemente	69
Abbildung 4-10:	Beschreibung von Gruppierungen für die Modellanalyse	71
Abbildung 4-11:	Verknüpfung von Modellen mit C&C ² -A.....	72
Abbildung 5-1:	Übersicht der Aktivitäten in der Entwicklung von EnhanCE Modelling als Methodenschulung zur Vermittlung des C&C ² -Ansatzes	78

Abbildung 5-2:	Konzeptioneller Aufbau der Methodenschulung EnhanCE Modelling mit den Sichten der TeilnehmerInnen und MethodenforscherInnen, jedoch noch ohne spezifische Schulungsinhalte	83
Abbildung 5-3:	Aufbau der initialen Schulung zum C&C ² -Ansatz auf Basis des Konzepts des EnhanCE Modelling übersetzt nach	85
Abbildung 5-4:	Für die Schulung aufbereitete technische Systeme mit Piktogramm der Abschnitte des EnhanCE Modelling, in denen sie genutzt werden. Links eine Rasthakenverbindung, mittig eine Keilsicherungsscheibe, rechts der Vorschubmechanismus einer Kartuschenpresse	89
Abbildung 5-5:	Kategorisierte qualitative Schwachstellen aus den Antworten der Freitextfrage in der Evaluation der initialen Schulung	90
Abbildung 5-6:	Einordnung der Elemente der initialen Schulung in die Bloom'sche Taxonomie	91
Abbildung 5-7:	Vermittlung von Inhalten in den Varianten des EnhanCE Modelling eingeordnet in die Bloom'sche Taxonomie	98
Abbildung 5-8:	Übersicht der Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling mit Lernzielen und Impressionen der Modellbildung	99
Abbildung 5-9:	Übersicht der Anwendungsschulung des EnhanCE Modelling mit Änderungen zur initialen Schulung (Grauberger et al. 2021)	101
Abbildung 5-10:	Übersicht der Syntheseschulung mit eingebetteten Methoden und Anwendungsbeispielen aus dem akademischen Umfeld sowie der praktischen Anwendung in Herausforderungen von Unternehmen	105
Abbildung 5-11:	Evaluation des didaktischen Aufbaus der Anwendungsschulung zum C&C ² -Ansatz (Grauberger et al. 2021)	107
Abbildung 5-14:	Herausforderungen in der Erstellung einer Visualisierung der Keilsicherungsscheibe	115
Abbildung 5-15:	Entwicklung der Systemdarstellung. Abgebildet ist die Kartuschenpresse als Stimulus für die Modellbildungsaufgabe für die TeilnehmerInnen der Validierungsstudie (Eisenmann et al. 2021a)	120
Abbildung 6-1:	Überblick über die Forschungshypothesen, Variablen und anwendbaren Teststatistiken für die experimentelle Methodenvalidierungsstudie (Grauberger et al. 2022)	126

Abbildung 6-2:	Aufbau der experimentellen Studie mit Darstellungen der verwendeten Systeme in der Kontroll- und Testgruppe sowie der VMG als Stimulus (Grauberger et al. 2022).....	130
Abbildung 6-3:	Beispiel für eine der sechs Aufgaben der Rasthakenverbindung auf der Systemebene mit Aufgabenbeschreibung, Verhaltensvorlage und Auswahlfeld (Grauberger et al. 2022).....	131
Abbildung 6-4:	Beispiel für eine der sechs Aufgaben zur Kartuschenpresse auf der Systemebene mit Aufgabenbeschreibung, Verhaltensvorlage und Auswahlfeld (Grauberger et al. 2022).....	133
Abbildung 6-5:	Zustände der Rasthakenverbindung und der Kartuschenpresse in einer Multiple-Choice-Aufgabe (Grauberger et al. 2022) ...	134
Abbildung 6-6:	Ansichten der Image-Maps der Beispielsysteme mit Unterscheidung von funktionskritischen und funktionsrelevanten Bereichen sowie Reststruktur (Grauberger et al. 2022).....	135
Abbildung 6-7:	Untersuchung des Einflusses der Gruppe und des Laufs auf den Score in der Systembewertung (Veränderung des Systemverständnisses auf Systemebene) (Grauberger et al. 2022).....	139
Abbildung 6-8:	Analyse des Einflusses der Modellbildungsmethode auf die Punktzahl bei der Systembewertung (Grauberger et al. 2022).....	140
Abbildung 6-9:	Analyse einer detaillierten Betrachtung jedes Systems auf seine Punktzahl in der Systembewertung (Veränderung des Systemverständnisses) (Grauberger et al. 2022)	141
Abbildung 8-1:	Forschungspotentiale im C&C ² -Ansatz.....	158

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Übersicht qualitativer Modelle zur Abbildung von GFZ nach ihren Modellzwecken.....	16
Tabelle 2-3:	Stärken und Herausforderungen zu qualitativen Modellen der Gestaltung.....	23
Tabelle 2-4:	Kognitive Niveaustufen nach der Bloom'schen Taxonomie	37
Tabelle 5-1:	Aufgedeckte Schwachstellen zum didaktischen Aufbau aus der Freitextfrage der Evaluation des Schulungskonzepts und gewählte Lösungen	92
Tabelle 5-2:	Aufgedeckte Schwachstellen der Visualisierung aus der Freitextfrage der Evaluation des Schulungskonzepts und gewählte Lösungen	93
Tabelle 5-3:	Aufgedeckte Schwachstellen der inhaltlichen Struktur aus der Freitextfrage der Evaluation des Schulungskonzepts und gewählte Lösungen	94
Tabelle 5-4:	Aufgedeckte Schwachstelle der praktischen Modellbildung aus der Freitextfrage der Evaluation des Schulungskonzepts und gewählte Lösungen	95
Tabelle 5-5:	Übersicht der Schulungsvarianten des EnhanCE Modelling....	96
Tabelle 5-6:	Antworten auf die Freitextfragen der Evaluation der Anwendungsschulung zum C&C ² -Ansatz.....	110
Tabelle 5-7:	Identifizierte Herausforderungen der Anwendbarkeit in den Schritten der Modellbildungsmethode zum C&C ² -Ansatz	117
Tabelle 6-1:	Übersicht über die Untersuchung der Detailebene hinsichtlich funktionsrelevanter Systemzustände zu Teilhypothese 2 (Grauberger et al. 2022).....	142
Tabelle 6-2:	Übersicht über die Untersuchung des Detaillierungsgrades bezüglich funktionskritischer Bereiche zu Teilhypothese 3 (Grauberger et al. 2022).....	143
Tabelle A-1:	Einordnung von Produktmodellen	XXV
Tabelle B-1:	Identifizierte Anwendungsfälle des C&C ² -Ansatzes.....	XXIX

Abkürzungsverzeichnis

ASD	Agile Systems Design – agiles Prozessmodell der Produktentwicklung
BF	Begrenzungsfläche
CAD	Computer-aided Design
CAE	Computer-aided Engineering
C	Connector
C&C ² -A	Contact and Channel Approach
C&C ² -M	Contact and Channel Model
CPM	Characteristics-Properties Modelling
DRM	Design Research Methodology
EnhanCE Modelling	Engineering training with hands on method application in Context specific Early Modelling – zu Deutsch: Schulung für Ingenieure mit praktischer Methodenanwendung in kontextspezifischer früh einsetzbarer Modellbildung
GFZ	Gestalt-Funktion-Zusammenhang
GK	Gerätekonstruktion – konstruktionsvertiefende projektarbeitsorientierte Master-Lehrveranstaltung zur Geräteentwicklung der Studiengänge Maschinenbau und Mechatronik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
LSS	Leitstützstruktur
mw	Mittelwert
N	Anzahl der Probanden
OdF	Ort der Funktionserfüllung
p	Signifikanzwert

r	Effekt nach Cohen (1988)
RS	Reststruktur
s	Standardabweichung
TS	Tragstruktur
VMG	Vermittlung der Modellbildungsmethode des C&C ² -Ansatzes durch die Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling (unabhängige Variable der Validierungsstudie in Kapitel 6)
WF	Wirkfläche
WFP	Wirkflächenpaar
Z	Standardisierte Zufallsvariable

1 Einleitung

Eine zentrale Tätigkeit in der Produktentwicklung ist die Gestaltung. In ihr werden gewünschte Funktionen in eine geeignete Produktgestalt umgesetzt. Die Produktidee wird dadurch konkretisiert, bis das Produkt soweit definiert ist, dass es hergestellt werden kann. Die Gestaltung entscheidet darüber, ob und wie gut ein Produkt seine Funktionen erfüllt. Um in der Gestaltung erfolgreich zu sein, ist es notwendig, das zu entwickelnde System in seinen Details zu verstehen, d.h. seine Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ) zu kennen. (Matthiesen 2021)

Hierzu wird eine Vielzahl an Produktmodellen¹ genutzt, die unterschiedliche Aspekte von Gestalt und Funktion eines Produkts abbilden. Diese Modelle können in qualitative und quantitative Modelle unterschieden werden. Qualitative Modelle bilden hierbei prinzipielle Elemente und Zusammenhänge im Produkt ab. Beispielsweise wird das Lagerungsprinzip einer Welle in einer Skizze definiert. Quantitative Modelle, beispielsweise CAD-Modelle, ergänzen die qualitativen Elemente und Zusammenhänge um spezifische Werte. Beispielsweise werden die Wellendurchmesser, Toleranzen und gewählten Lager spezifiziert, wodurch das System herstellbar wird. Quantitative Modelle sind zumeist rechnergestützt und mittlerweile allgegenwärtig in der Produktentwicklung. Sie werden zur Synthese des Produkts (CAD²-Modelle, Topologieoptimierung) und in der Analyse seines Verhaltens (Mehrkörpersimulations- oder FEM³-Modelle) genutzt.

Diese Modelle sind explizit, d.h. sie liegen in einer dokumentierten Form vor und können von ihrem Ersteller unabhängig genutzt werden. Sowohl qualitative als auch quantitative explizite Modelle basieren auf Annahmen ihrer Ersteller. Diese sind häufig nicht explizit abgebildet, sondern liegen in mentalen Modellen als Ideen und Vorstellungen vor. Diese impliziten Modelle können abhängig von der Erfahrung sehr umfangreich werden, sind aber schwer greifbar und können dadurch unbeachtet Lücken und auch Fehler beinhalten (Meboldt et al. 2012). Werden auf Basis fehlerhafter mentaler Modelle Konstruktionsentscheidungen getroffen, kann dies zu Iterationen bis hin zu Produktrückrufen nach der Markteinführung führen. Um diese Problematik zu adressieren, können mentale Modelle durch geeignete qualitative

¹ Als Produktmodell wird im Kontext dieser Arbeit ein Modell verstanden, das Aspekte eines Produkts abbildet. In dieser Arbeit wird unter Modell, falls nicht anderweitig spezifiziert, immer ein Produktmodell verstanden.

² Computer-aided Design

³ Finite Elemente Methode

Modelle als Gedankenstütze expliziert werden. Es existiert eine Vielzahl an qualitativen Modellen zur Modellbildung von GFZ. Diese besitzen unterschiedliche Möglichkeiten zur Modellbildung und Anwendungsgebiete, werden jedoch in der Gestaltung mit Ausnahme von Skizzen seltener eingesetzt als quantitative Modelle.

Eines dieser qualitativen Modelle ist das Contact and Channel Modell (C&C²-Modell), das mit Hilfe des Contact and Channel Ansatzes (C&C²-Ansatz) erstellt werden kann. Es kann beispielsweise Ideen und Konzepte, aber auch konstruktive Details auf Basis beliebiger Visualisierungen des Produkts abbilden. Somit wird das mentale Modell für Analysen bezüglich Lücken und Fehlern zugänglich. Das in ihm abliegende Wissen ist zudem unabhängig vom Ersteller des mentalen Modells verfügbar, was der Wissensabwanderung durch Unternehmenswechsel von Konstrukteur/-innen entgegenwirken kann. Um die Vorteile des C&C²-Ansatzes nutzen zu können, muss er angewendet werden können. Hierzu fehlt eine methodische Unterstützung.

Eine Forschungslücke ist, dass unbekannt ist, wie eine methodische Unterstützung zur Modellbildung gestaltet sein muss, um eine zielführende Modellbildung auch für Novizen im Umgang mit C&C²-Ansatz zu ermöglichen. Die bereits vorliegenden Heuristiken zur Modellbildung wurden für spezielle Situationen entwickelt und haben nicht das Ziel, die Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz allgemein zu unterstützen. Außerhalb von Fallstudien mit Experten im C&C²-Ansatz wurden sie bislang nicht untersucht. Dadurch liegen keine Erkenntnisse zu ihrer Anwendbarkeit vor.

In dieser Forschungsarbeit wird das EnhanCE Modelling als Methodenschulung zur Vermittlung und Erforschung von qualitativer Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz entwickelt. Anschließend werden die Erforschungsmöglichkeiten in EnhanCE Modelling genutzt, um die Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz hinsichtlich der Erfolgsfaktoren Anwendbarkeit und Nutzen zu validieren.

1.1 Struktur der Arbeit

Diese Forschungsarbeit ist in acht Kapitel untergliedert. In Abbildung 1-1 ist ihre Struktur dargestellt.

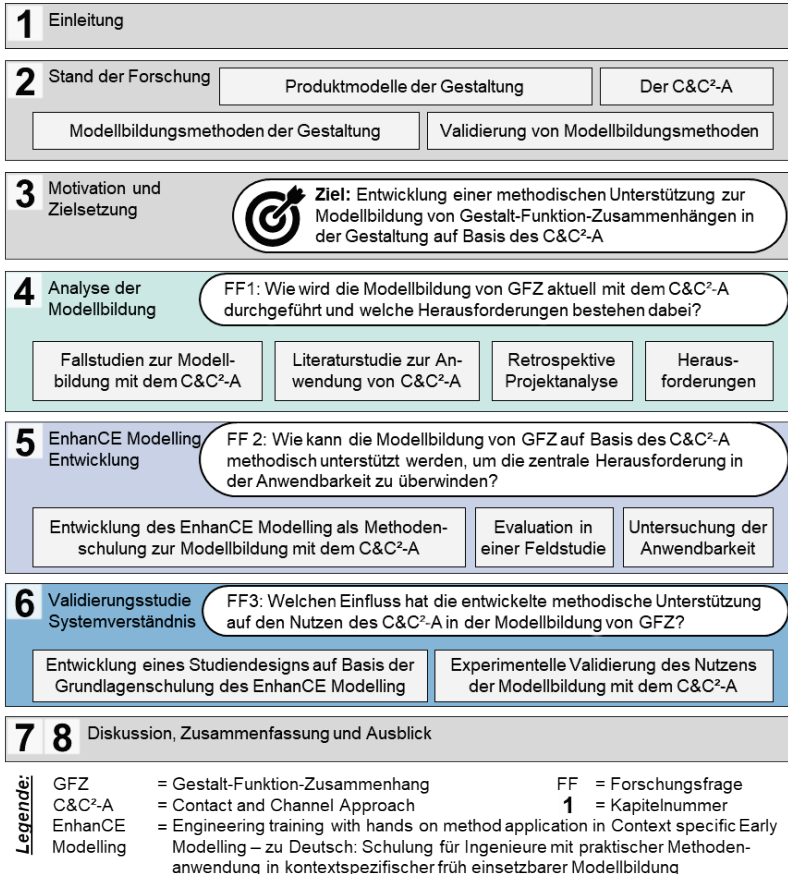


Abbildung 1-1: Struktur der Forschungsarbeit

In Kapitel 2 werden Grundlagen von Produktmodellen in der Gestaltung mit Fokus auf qualitative Modelle beschrieben. Zudem werden Modellbildungsmethoden und Möglichkeiten ihrer Validierung skizziert. Weiter wird der C&C²-Ansatz als in dieser

Arbeit betrachteter Modellbildungsansatz in seinen Grundlagen detailliert dargestellt.

In Kapitel 3 wird die Motivation und Zielsetzung der Arbeit erläutert. Weiter werden die Forschungsfragen der Arbeit und das Forschungsdesign beschrieben.

Kapitel 4 beschreibt die Analyse der Modellbildung von GFZ mit dem C&C²-Ansatz. In zwei Fallstudien wird der C&C²-Ansatzes angewandt und anschließend in einer Literaturstudie und einer retrospektiven Projektanalyse detailliert betrachtet. Durch die Identifikation von Herausforderungen wird die Basis für die in dieser Arbeit entwickelte methodische Unterstützung gelegt.

Kapitel 5 beschreibt die Entwicklung von EnhanCE Modelling als Methodenschulung zur Vermittlung und Erforschung der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz. EnhanCE Modelling beinhaltet die Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes und besteht aus drei Varianten einer Schulung, welche zur kontextspezifischen Vermittlung des C&C²-Ansatzes genutzt werden können. Diese Schulungsvarianten sind modular konzipiert und bieten die Möglichkeit, die Erfolgsfaktoren Anwendbarkeit und Nutzen des C&C²-Ansatzes zu untersuchen. Die Entwicklung wird durch die Untersuchung der Anwendbarkeit der durch EnhanCE Modelling vermittelten Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz abgeschlossen.

Kapitel 6 beschreibt die Validierungsstudie zur Untersuchung des Einflusses der durch EnhanCE Modelling vermittelten Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz auf das Systemverständnis. Zunächst werden die zur experimentellen Untersuchung des Nutzens notwendigen Variablen operationalisiert. Anschließend wird ein Experiment auf Basis der Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling durchgeführt und ausgewertet.

In Kapitel 7 werden die erzielten Ergebnisse dieser Forschungsarbeit in den Kontext des Stands der Forschung gesetzt. Abschließend wird in Kapitel 8 ein Ausblick auf weiterführendes Forschungspotential gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Im Folgenden werden Grundlagen dieser Forschungsarbeit beschrieben. Diese Grundlagen lassen sich in die direkt adressierten Forschungsfelder *Produktmodelle* und *Modellbildung der Gestaltung* sowie *Validierung von Modellbildungsmethoden* unterteilen. Sie sind in Abbildung 2-1 dargestellt.

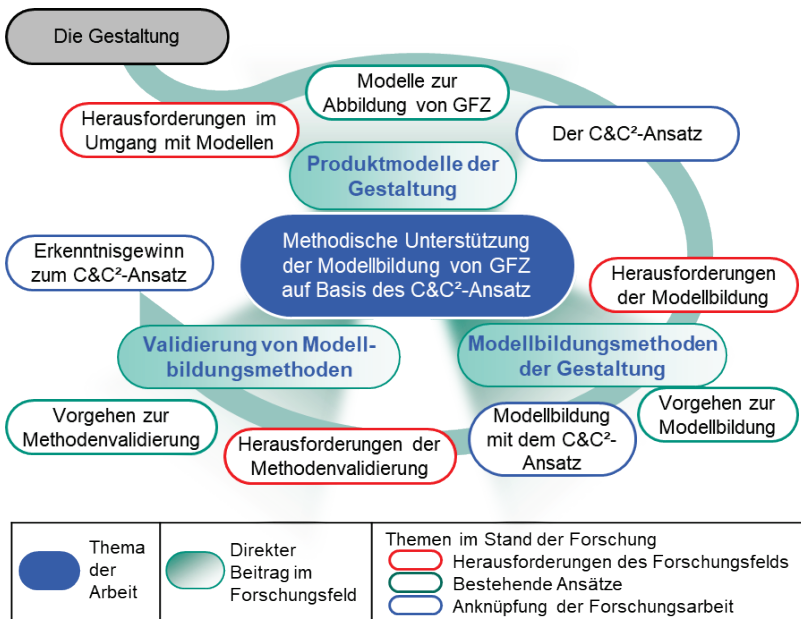


Abbildung 2-1: Übersicht des Stands der Forschung

Aus dem Stand der Forschung wird zunächst ein Umriss der Aktivitäten der Gestaltung als Teil der Produktentwicklung herausgearbeitet. Anschließend werden im Stand der Forschung beschriebene Grundlagen zu Produktmodellen der Gestaltung aufbereitet. Hierbei werden zunächst allgemeine Herausforderungen im Umgang mit Modellen in der Gestaltung skizziert. Darauf aufbauend werden qualitative Modelle zur Abbildung von GFZ fokussiert. In diesem Abschnitt wird auch der Stand der Forschung zum C&C²-Ansatz als Basis dieser Forschungsarbeit detailliert dargestellt.

An die Betrachtung der Modelle anschließend werden bereits im Stand der Forschung identifizierte Herausforderungen in der Modellbildung beschrieben. Es werden verschiedene Modellbildungsmethoden dargestellt, die den Aufbau von Modellen der Gestaltung unterstützen sollen. Die Forschung zu Modellbildungsmethoden zum Aufbau von Modellen mit dem C&C²-Ansatz wird detailliert beschrieben.

Abschließend wird der Stand der Forschung zur Validierung von Modellbildungsmethoden beschrieben. Es werden Herausforderung und Vorgehensmodelle zur Methodenvalidierung dargestellt. Weiter werden verschiedene Studiendesigns und Untersuchungsumgebungen hinsichtlich des mit ihnen möglichen Erkenntnisgewinns aufgezeigt. Abschließend werden bisherige Forschungsergebnisse zum C&C²-Ansatz sowie die dort aufgedeckten Forschungslücken beschrieben.

2.1 Die Gestaltung in der Produktentwicklung

Da diese Forschungsarbeit einen Beitrag zur methodischen Unterstützung der Gestaltung darstellt, wird diese Phase der Produktentwicklung im Folgenden eingeordnet und ihre zentralen Elemente und Aktivitäten beschrieben. Zudem wird Forschungsbedarf durch Veränderung der Praxis in der Gestaltung beschrieben.

2.1.1 Einordnung der Gestaltung in Prozesse der Produktentwicklung

Die Gestaltung umfasst alle Aktivitäten, in welchen auf Basis einer gewünschten Funktion eine Gestalt entworfen wird, durch welche diese Funktion erfüllt werden kann. In ihr müssen viele Anforderungen und Randbedingungen bei der Festlegung der konstruktiven Details der Gestalt beachtet werden. Diese konstruktiven Details entscheiden über die Güte der Funktionserfüllung und auch die Herstellungskosten eines Produkts. (Matthiesen 2021)

Nach dem Produktentwicklungsprozess des Pahl/Beitz (Feldhusen und Grote 2013) findet sich ihr Schwerpunkt in der Konzept-, Entwurfs- und Ausarbeitungsphase. Im Modell des Produktentwicklungsprozesses nach VDI2221 (VDI 2221:2018-03 Blatt 1) kann die Gestaltung in die Phasen „Gliedern in Module“, „Gestalten der Module“ und „Integrieren des gesamten Produkts“ eingeordnet werden. Durch das zunehmend verbreitete Frontloading, d.h. die Verschiebung von Aktivitäten in die frühen Phasen der Produktentwicklung (Albers et al. 2016a), werden Gestaltungsaktivitäten schon früh in der Entwicklung notwendig.

In bisher häufig genutzten Produktentwicklungsprozessen wie dem Wasserfall-Modell wird der frühe Einsatz von Gestaltungsaktivitäten nicht abgebildet. Ansätze der agilen Produktentwicklung berücksichtigen diese Aktivitäten beispielsweise durch Prototypeneinsatz in der Konzeptionierung. Sie werden deshalb in neuerer Zeit verstärkt genutzt. In den frühen Gestaltungsaktivitäten agiler Ansätze sind quantitative Modelle aufgrund fehlender Informationen häufig noch nicht nutzbar, was zu Problemen in ihrer Implementierung in Unternehmen führen kann. Beispielsweise müssen im ASD - Agile Systems Design bereits zu Beginn eines Entwicklungsprojektes konstruktive Details von Referenzprodukten verstanden werden (Albers et al. 2019a). Zudem ist das Testing mittels Prototypen ein zentrales Element dieser agilen Ansätze. Um diese Prototypen zielführend in der Gestaltung nutzen zu können, müssen sie die konstruktiven Details ausreichend genau abbilden, um GFZ mit ihnen untersuchen zu können. Dies wird jedoch häufig nicht unterstützt, da den meisten agilen Entwicklungsansätzen die Betrachtung technischer Details fehlt. Das Prototyping hat dort den Fokus auf der Kundeninteraktion, für die vor allem Produktdesign-Aspekte relevant sind (Grauberger et al. 2020c). Zusammenfassend zeigt sich, dass Gestaltungsaktivitäten verstärkt früh in der Produktentwicklung notwendig werden. Dabei müssen sie auf Basis von weniger verfügbaren Informationen und quantitativen Modellen wie beispielsweise CAD Modellen, stattfinden.

2.1.2 Elemente und Aktivitäten in der Gestaltung

Zentrale Aktivitäten der Gestaltung sind die Analyse und Synthese. In der Analyse ist das Ziel, Erkenntnisse zu GFZ zu gewinnen. Hierbei wird entweder ein bereits bestehendes System untersucht, um Erkenntnisse für seine Weiterentwicklung zu gewinnen, oder es wird geprüft, ob die Synthese einer neuen Gestalt erfolgreich war. Die Analyse kann auf verschiedenen Ebenen stattfinden. Zunächst wird sie mental durchgeführt, um zu verstehen, wie sich ein System verhält oder zu reflektieren, ob die entwickelte Gestalt ihre Funktion erfüllen kann. Die Analyse der Dokumentation wird durchgeführt, wenn GFZ auf Basis von vorhandenen Zeichnungen oder Versuchsdaten verstanden werden können. Die Beobachtung des Systems wird dann notwendig, wenn die mentale Analyse und Betrachtung der Dokumentation nicht ausreichen, um unbekannte GFZ zu identifizieren. Der Abgleich von Ist- und Sollfunktion wird notwendig, um den Erfolg der Synthese zu überprüfen und quantitative Erkenntnisse zur Funktionserfüllung zu gewinnen. (Matthiesen 2021)

In der Synthese ist das Ziel die Definition einer Gestalt, mit welcher die gewünschte Soll-Funktion erfüllt werden kann. Hierbei ist es wichtig, den GFZ soweit zu verstehen, dass die Einflüsse von Merkmalen der Gestalt auf das Systemverhalten (die Ist-Funktion) und die Soll-Funktion gezielt genutzt werden können. Die Gestaltung

kann immer dann mit einer Synthese beginnen, wenn bereits ausreichendes Wissen zu GFZ vorliegen. Ansonsten muss zunächst eine Analyse durchgeführt werden. Nach Abschluss der Synthese sollte ebenfalls immer ein Analyseschritt erfolgen, in welchem sie überprüft wird. (Matthiesen 2021)

Ohne eine Vorstellung davon, durch welche Gestalt eine Funktion erfüllt werden kann, ist keine Gestaltung möglich. Deshalb ist das zentrale Element der Gestaltung das Modell des GFZ. Dieses Modell kann sowohl implizit als Erfahrung und Wissen im Kopf der Konstrukteure vorliegen als auch in expliziten Modellen abgebildet werden. Es beinhaltet Erkenntnisse und auch Vermutungen. Erkenntnisse sind dabei geprüfte Vermutungen. (Matthiesen 2021)

Um Erkenntnisse in der Gestaltung zu gewinnen, kann das Testing genutzt werden. Virtuelle Tests in Form von Simulationen werden aufgrund verschiedener Vorteile häufig genutzt. In physischen Tests liegt der Fokus meist auf der Produktvalidierung, beispielsweise in Lebensdauer- oder Belastungstests. Auch in der Untersuchung von Phänomenen, die schwierig zu simulieren sind (beispielsweise Reibphänomene) werden sie eingesetzt. Andererseits werden physische Tests in der Konzeptphase genutzt, um die Ideenfindung zu unterstützen. Beispielsweise werden sogenannten „Wizard of Oz“ Prototypen (Dow et al. 2005) genutzt, mit welchen Produktfunktionen bereits vor ihrer Umsetzung im Produkt erlebbar werden. (Matthiesen 2021)

Der Umgang mit dem zentralen Modell des GFZ ist eine der größten Herausforderungen in der Gestaltung, da die in ihm vorhandenen Informationen zumeist in vielen einzelnen Modellen oder auch als implizites Erfahrungswissen vorliegen. Hierdurch ist ein Überblick über vorhandene Informationen schwierig. Zudem ist ein großer Teil des vorhandenen Wissens zu GFZ an erfahrene Produktentwickler gebunden, welche an geeigneter Stelle in Projekte eingebunden sein müssen, um es nutzen zu können.

Zusammenfassend ist das Ziel der Gestaltung die Definition einer Produktgestalt mit welcher die gewünschten Sollfunktionen erfüllt werden können. Zentrale Aktivitäten der Gestaltung sind Analyse, in der GFZ aufgedeckt und geprüft werden, und Synthese, in der auf Basis der Analyse eine geeignete Gestalt entwickelt wird. Zentrales Element ist das Modell des GFZ, ohne welches das Ziel der Gestaltung nicht erreicht werden kann.

Forschungsbedarf der Gestaltung besteht darin, den frühen Einsatz ihrer Aktivitäten zu Beginn der Produktentwicklung zu unterstützen. Weiter ist der Umgang mit Wissen zu GFZ aktuell eine Herausforderung, da dieses über viele Modelle verteilt und teilweise auch nur implizit als Erfahrungswissen vorliegt.

2.2 Modelle in der Gestaltung

In den Aktivitäten der Gestaltung kommt eine fast unüberschaubare Vielzahl an Modelle zum Einsatz (Ehrlenspiel und Meerkamm 2017). Im Folgenden wird die Betrachtung auf Modelle des Produkts eingeschränkt, welche die Aspekte Funktion und Gestalt beinhalten. Der Begriff der Funktion wird dabei in Sollfunktion (Zweck des Produkts) und Ist-Funktion (Verhalten) unterschieden (Matthiesen 2021). Für weiterführende Betrachtungen dieser Begriffe sei auf die Arbeiten von Alink (2010) und Erden et al. (2008) verwiesen. Prozessmodelle werden im Kontext dieser Forschungsarbeit nicht betrachtet.

In der Bildung und Nutzung von Modellen treten allgemein Herausforderungen auf, welche in den drei Hauptmerkmalen Abbildung, Verkürzung und Pragmatismus von Modellen nach Stachowiak (1973) begründet sind. Diese werden im Folgenden in den Kontext der Gestaltung gesetzt.

2.2.1 Begrenzte Abbildungsmöglichkeiten des Originals

Ein Modell ist immer ein Abbild eines Originals. Hierbei kann das Original ebenfalls wieder ein Modell eines anderen Originals sein (Stachowiak 1973). Dieses Original muss nicht zwangsläufig physisch vorliegen, d.h. auch das noch nicht entwickelte Produkt kann ein Original für die Modelle, die seiner Erstellung dienen, sein.

Eine hierbei auftretende Herausforderung ist die begrenzte Abbildungsmöglichkeit des Originals in einem Modell. Beispielsweise wird eine Toleranz auf einer technischen Zeichnung definiert. Für den Zweck der Fertigbarkeit des Produkts ist dies ausreichend. Zur Beantwortung der Frage, warum diese Toleranz gewählt wurde, bietet die technische Zeichnung jedoch keine Abbildungsmöglichkeit (Matthiesen 2021). Problematisch wird dies, wenn kein geeignetes Modell verfügbar ist, um diese Informationen so abzubilden, dass sie bei Bedarf zugänglich sind. Im Beispiel könnte ein erfahrener Konstrukteur noch wissen, warum diese Toleranz vergeben wurde. Die Informationen dazu liegen damit in seinem impliziten mentalen Modell ab. Um sie zu nutzen, muss bekannt sein, dass dieser Konstrukteur die Information besitzt und es muss die Möglichkeit bestehen, ihn im richtigen Moment zu konsultieren.

Die Herausforderung der begrenzten Abbildungsmöglichkeiten wird in der Modellforschung durch integrative oder föderalistische Ansätze adressiert. Integrative Ansätze haben das Ziel, ein Modell zu erstellen, das möglichst alle für das Produkt relevanten Informationen beinhaltet. Dieses ideale integrative Modell wird auch als das Produktmodell bezeichnet (Vajna et al. 2018). Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass kein Modellwechsel für den Nutzer notwendig ist. In der Gestaltung wird der integrative Ansatz insbesondere bei rechnerunterstützten Modellen wie beispielsweise CAD oder Modellen des Computer-aided Engineering (CAE) genutzt, indem neue Aspekte in bereits bestehende Modelle integriert werden. Ein Nachteil des integrativen Ansatzes ist, dass er zur Entstehung von sehr umfangreichen Modellen führen kann. In der qualitativen Modellbildung kann er dazu führen, dass Modelle durch ihren Umfang für Anwender schwer verständlich und damit nutzbar sind. Dies gilt insbesondere für Modelle, die nicht in rechnerunterstützten Tools implementiert sind, welche eine Vernetzung der Informationen ermöglichen.

Im Ansatz des Modellföderalismus werden autarke Modelle über Schnittstellen an eine Föderationsplattform angebunden (Kleiner et al. 2017). Der Modellföderalismus in der Gestaltung ist schwerpunktmäßig auf kurze Verkettungen von quantitativen Modellen (beispielsweise CAD-CAE) beschränkt. Weitere Ansätze des Modellföderalismus bestehen in der Strukturierung bestehender Modelle (Matthiesen et al. 2019a; Weidmann et al. 2017). Hierbei werden Potentiale zur Modellverknüpfung aufgezeigt, jedoch keine explizite Modellverkettung ausgearbeitet. Modellföderalismus im Sinne einer algorithmisierten Modellkette für die Gestaltung, wie sie beispielsweise von Roth (2000) entwickelt wurde, konnte sich aufgrund der in der Gestaltung notwendigen Flexibilität der Modellbildung nicht durchsetzen (Alink 2010).

Insbesondere in der qualitativen Modellbildung der Gestaltung ist der Modellföderalismus schwach ausgeprägt, wodurch viele autarke Insellösungen existieren. Qualitative Modelle ermöglichen eine schlanke Modellbildung zu meist speziellen Zwecken, werden jedoch meist nicht im Sinne eines Modellföderalismus erforscht. Ein Beispiel hierfür ist das C&C²-Modell, der zur qualitativen Abbildung von GFZ genutzt werden kann. „Nicht-Funktionen“ als ungewolltes Verhalten aufgrund fehlender Funktionen müssen in bestimmten Fragestellungen ebenfalls betrachtet werden. Beispielsweise fehlt bei Leakage die Funktion „System zur Umgebung abdichten“. Diese fehlenden Funktionen sind mit C&C²-Modellen schwer abbildbar. Zu diesem Zweck wurde das Wirkraummodell (Beetz et al. 2017) entwickelt, das geeignete Elemente beinhaltet. Um diese ähnlichen, aber trotzdem autarken Modelle im Sinne eines Modellföderalismus zu verbinden und gemeinsam nutzen zu können, sind geeignete Schnittstellen notwendig, an denen Systemgrößen zwischen den Modellen übergeben werden können.

2.2.2 Lücken und Fehler durch Verkürzung

Ein Modell beinhaltet nie alle Aspekte des Originals, sondern nur eine subjektiv festgelegte Teilmenge (Stachowiak 1973). Es muss dadurch das Original immer verkürzt abbilden, wobei abgebildete Elemente vereinfacht und nicht als relevante erachtete Elemente weggelassen werden. Eine Herausforderung hierbei ist die Unklarheit über Lücken und Fehler im Modell. Beispielsweise muss ein unvorhergesehenes Versagen eines Produkts analysiert werden. In dieser Analyse wird ausschließlich mit Modellen gearbeitet, die in der Entwicklung des Produkts erstellt wurden. Diese Modelle beinhalten alle Aspekte, welche die Entwicklung des herstellbaren Produkts auf Basis des gewählten Konzepts ermöglichen. Beispielsweise sind geometrische Parameter und Materialeigenschaften abgebildet. Lücken in diesen Modellen entstehen dadurch, dass bestimmte Informationen in ihnen nicht abgebildet sind. Das Verschleißverhalten stellt beispielsweise eine Lücke in diesen Modellen dar, da es noch unbekannt ist. Vgl. auch (Lemburg 2009).

Fehler in diesen Modellen entstehen beispielsweise durch die idealisierte virtuelle Geometrie, die in dieser Form nicht herstellbar ist. Diese Fehler können beispielsweise durch Skin Models (Schleich et al. 2014) adressiert werden, welche die reale Geometrie einer Komponente in ihrer virtuellen Abbildung berücksichtigen können. Auswirkungen zeigen diese Modellfehler dann, wenn sie den Modellnutzern nicht bewusst sind. Dies führt dazu, dass auf Basis falscher Annahmen entwickelt wird.

Um diese Herausforderungen adressieren zu können, müssen Lücken und Fehler der gebildeten Modelle in ihrer Relevanz für die jeweilige Problemstellung eingeschätzt werden können. Hierzu ist ein gewisses Systemverständnis notwendig. Dieses Systemverständnis liegt selbst wieder als implizites mentales Modell vor, da Erkenntnisse allgemein nur in und durch Modelle möglich sind (Stachowiak 1973). Dieses mentale Modell kann abhängig von der Erfahrung sehr mächtig werden (Meboldt et al. 2012). Es ist jedoch Außenstehenden nicht zugänglich, sondern muss hierzu in geeigneten Modellen expliziert werden.

Mentale Modelle enthalten Lücken und Fehler. Da explizite Modelle daraus abgeleitet werden, haben die Lücken und Fehler mentaler Modelle eine große Tragweite. Beispielsweise ist es ohne ein tragfähiges Produktkonzept (aus einem impliziten, qualitativen Modell) auch mit rechnerunterstützten expliziten Modellen nicht möglich, ein leistungsfähiges Produkt zu entwickeln (Vajna et al. 2018). Im Aufbau und der Nutzung von mentalen Modellen können qualitative explizite Modelle unterstützen (Vester 2002). Diese qualitativen Modelle ermöglichen die Abbildung von Aspekten eines Produkts, bevor es ausreichend detailliert definiert ist, um in rechnerunterstützte quantitative Modelle überführt zu werden. Sie sind tendenziell weniger

aufwändig zu erstellen und können auch unsichere Informationen integrieren (Fuchs 2005).

2.2.3 Zweckentfremdung durch unklare Grenzen

Ein Modell wird immer für einen bestimmten Zweck aufgebaut, für den es gültig ist. Es wird zudem für bestimmte Modellnutzer (Menschen oder Computer) aufgebaut und ist nur in einem definierten Zeitraum gültig (Stachowiak 1973).

Eine Herausforderung in der Modellnutzung ist die Zweckentfremdung von Modellen. Diese entsteht dadurch, dass (meist mit hohem Aufwand) erstellte Modelle ohne notwendige Adaption weiter genutzt werden (Eckert et al. 2015). Beispielsweise kann eine Kinematiksimulation auf Basis der idealen Geometrie eines CAD-Modells erfolgen. Die Ergebnisse der Kinematiksimulation bilden die Realität in bisherigen Produkten ausreichend genau ab und werden zur Prüfung der Funktionserfüllung genutzt. Wenn eine konstruktive Änderung, beispielsweise des Materials vom präzise gefertigten Aluminium-Frästeil zu einem günstigeren Kunststoff-Spritzgussteil erfolgt, kann es sein, dass die reale Geometrie weit von der im CAD konstruierten abweicht. Der Einsatz des bisher gültigen Modells findet dadurch außerhalb seines Gültigkeitsbereichs statt und die abgeleiteten Aussagen zur Funktionserfüllung sind unbrauchbar. Wird dies zu spät erkannt, können aufwändige Iterationen die Folge sein. Um die Herausforderung zu adressieren, ist Klarheit über den Zweck und die Grenzen eines Modells notwendig. Dies stellt einen entscheidenden Schritt der Modellbildung dar, der jedoch häufig nur implizit durchgeführt und nicht dokumentiert wird.

2.2.4 Zusammenfassung zu Modellen in der Gestaltung

Zusammenfassend werden im Stand der Forschung unzureichende Abbildungsmöglichkeiten von Modellen durch integrative und föderalistische Ansätze adressiert. Fehler und Lücken in Modellen können durch explizite Abbildung in qualitativen Modellen verhindert bzw. geschlossen werden. Zur gezielten Wiederverwendung von Modellen ist Klarheit über ihren Zweck und die Grenzen ihrer Anwendbarkeit notwendig.

2.3 Modelle zur Abbildung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen

Dieses Kapitel basiert auf der Publikation (Matthiesen et al. 2019a). Teile des folgenden Texts sind ohne Veränderung aus der Veröffentlichung in deutscher Form übernommen.

Funktion und Gestalt als zentrale Elemente der Gestaltung können unterschiedlichen Domänen zugeordnet werden (Alink 2010; Suh 1998). Viele Modelle in der Gestaltung sind einer dieser Domänen zugeordnet, beispielsweise CAD-Modelle der Gestaltdomäne oder Funktionsbäume der Funktionsdomäne. Zudem existieren Modelle, welche die Abbildung der GFZ als Zusammenhänge zwischen diesen Domänen ermöglichen. Diese werden als Basis der Forschungsarbeit im Folgenden näher betrachtet.

In der Betrachtung von Modellen zur Abbildung von GFZ ist die Unterscheidung in qualitative und quantitative Modelle wichtig. Quantitative GFZ Modelle sind weit verbreitet und größtenteils in rechnerunterstützten Tools implementiert. Um quantitative GFZ zu modellieren, ist es notwendig, den Einfluss definierter Gestaltparameter auf ein messbares Systemverhalten analysieren zu können (Matthiesen et al. 2020). Hierzu können rechnerunterstützte Simulationsmodelle und auch statistische Modelle, die auf empirischen Versuchen basieren, genutzt werden (Thomke 2001). Beispiele hierfür sind Mehrkörpersimulationen oder lineare Regressionsmodelle, mit denen Effekte von Gestaltparametern auf ein Systemverhalten ermittelt werden kann.

Ein Überblick über bestehende Produktmodelle ist in Abbildung 2-2 in Form eines Frameworks dargestellt. Es wird aus den Dimensionen Zweck und Phase aufgespannt. Die Zwecke werden nach den übergeordneten Modellzwecken von Andreassen et al. (2015) kategorisiert (vgl. auch Kapitel 2.3). Die Phasen werden nach *Ausarbeitung* (Parameter des Produkts müssen vorhanden sein) und *Entwurf und Ausarbeitung* (Parameter müssen noch nicht vorhanden sein) unterschieden. Aus diesen Dimensionen ergeben sich sieben Cluster, da das Cluster *Konzeptionierung / Ausarbeitung* per Definition nicht existieren kann. Der Modellzweck Kommunikation wird nicht genutzt, da keine eindeutige Zuordnung zu ihm möglich ist. Alle Modelle enthalten diesen Zweck, aber kein identifiziertes Modell ist ausschließlich zur Kommunikation gedacht.

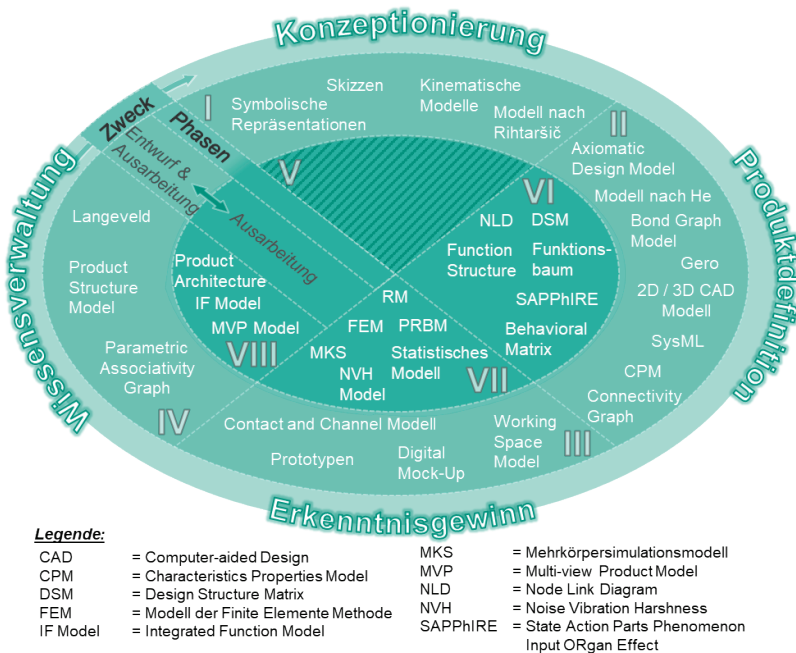


Abbildung 2-2: Framework von Produktmodellen in der Gestaltung, übersetzt nach (Matthiesen et al. 2019a)

Es wurden 34 verschiedene Produktmodelle identifiziert, die in das Framework und die ergänzende Tabelle eingetragen wurden. Die Kategorien dieser Tabelle basieren auf der Arbeit von Weidmann et al. (2017). Die Kategorie Informationsart wurde auf Basis der Beschreibungen in Pahl/Beitz (2007) und Matthiesen (2021) erweitert. Die Struktur dieser Tabelle ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

Produktmodell (Quelle)	Darstellungsart				Informationsart				Framework-Cluster	
	Analytisch	Graphisch	Tabelle / Matrix	Textuell	Physisch	Funktion	Verhalten	Gestalt - qualitativ		Gestalt - quantitativ
Beispielmodell	X	X					X		X	VII

Abbildung 2-3: Tabelle von Produktmodellen in der Gestaltung, übersetzt nach (Matthiesen et al. 2019a)

Die Einordnung der identifizierten Modelle befindet sich aus Gründen der Übersicht in Tabelle 8-1 im Anhang dieser Forschungsarbeit.

Hierbei zeigte sich, dass viele Modelle der Gestaltung (28 / 34) GFZ abbilden können. Ein Großteil der Modelle dient dem Zweck der Produktdefinition und dem Erkenntnisgewinn auf Basis eines parametrisierten Produkts. Diese vorwiegend quantitativ-rechnergestützten Modelle basieren oft auf impliziten Eingangsgrößen wie Expertenwissen oder getroffenen Annahmen. Auch Modelle, die mit rein qualitativen Daten umgehen können (Phase Entwurf & Ausarbeitung), existieren zu allen Zwecken.

Hier zeigt sich ein klarer Schwerpunkt in Modellen zur Produktdefinition. In der Konzeptionierung sind Skizzen und auf ihnen basierenden Modelle mit geringer Formalisierung stark vertreten. In der Wissensverwaltung wurden nur wenige Modelle identifiziert, welche einen starken Bezug zu Modellen der Produktdefinition haben. Im Modellzweck des Erkenntnisgewinns wurden mit Prototypen und Digital Mockup zwei in der Regel mächtige und ressourcenintensive Modelle identifiziert. Zudem wurden mit dem C&C²-Modell und dem Wirkraummodell zwei mit qualitativen Informationen nutzbare Modelle auf Basis des C&C²-Ansatzes identifiziert.

Auffällig ist zudem, dass viele Modelle ähnliche Aspekte abbilden, jedoch keine Schnittstellen zueinander aufweisen und dadurch untereinander nicht anschlussfähig sind. Dies betrifft insbesondere Modelle, welche auf Basis qualitativer Daten genutzt werden können. Quantitativ-rechnerunterstützte Modelle sind meist (theoretisch) durch Übergabe der modellierten Parameter oder der zugrundeliegenden CAD-Modelle miteinander kompatibel.

Einschränkungen dieser Ausarbeitung von Produktmodellen der Gestaltung bestehen darin, dass nur eine möglicherweise verzerrte Auswahl an Produktmodellen identifiziert wurde, da dies abhängig von den gewählten Datenbanken und Begriffen in der Literaturrecherche ist. Produktmodelle, die unternehmensintern entwickelt und nicht wissenschaftlich publiziert wurden, sind durch das gewählte Studiendesign ebenfalls nicht erfassbar. (Matthiesen et al. 2019a)

Im Folgenden wird eine Auswahl dieser Modelle zur Abbildung von qualitativen GFZ näher beschrieben. Diese Auswahl basiert auf der Literaturstudie von Matthiesen et al. (2019a) und wurde um zusätzliche aktuell entwickelte Modelle erweitert. Diese Beschreibung schafft einen Überblick über qualitative Möglichkeiten der Modellbildung und -nutzung in der Gestaltung.

Es werden qualitative Modelle, die GFZ abbilden können und direkt aus mentalen Modellen ableitbar sind, in die Auswahl übernommen. Sie werden nach den Modellzwecken von Andreasen et al. (2015) zugeordnet. Die Zuordnung ist nicht ausschließlich, d. h. die eingeordneten Modelle können durchaus auch zu anderen Zwecken anwendbar sein. Sie erfolgte nach dem identifizierten Schwerpunkt des jeweiligen Modells. In Tabelle 2-1 ist eine Übersicht der näher betrachteten Modelle dargestellt.

Tabelle 2-1: Übersicht qualitativer Modelle zur Abbildung von GFZ nach ihren Modellzwecken

Kapitel dieser Forschungsarbeit	Modellzweck	Modell
2.3.1	Konzeptionierung	Freie Skizzen
		Organ Domain Modelle
		Modell nach Rihtaršič
2.3.2	Produktdefinition	Bondgraphen
		Axiomatic Design Modelle
		Characteristics-Properties Modelling CPM
		Graph-based Tolerancing
2.3.3	Wissensverwaltung	Product Structure Model
2.3.4	Erkenntnisgewinn	Wirkraummodell
Kraftfluss-Modell		
2.4		C&C ² -Ansatz

2.3.1 Konzeptionierung

In der Konzeptionierung werden Modelle eingeordnet, mit denen mentale Modelle zu neuen Ideen expliziert werden können. Ihr Schwerpunkt liegt in der Unterstützung der Ideenfindung. (Andreasen et al. 2015)

Freie Skizzen

Freie Skizzen können als nicht-formalisierte zweidimensionale Darstellung von Aspekten eines technischen Systems beschrieben werden, die der Unterstützung von Aktivitäten in der Produktentwicklung dienen (Moeser et al. 2015). Sie können auf beliebiger Abstraktionsebene erstellt werden und unterstützen beispielsweise durch schnelle Visualisierung von Ideen oder Explikation gedanklicher Vorgänge beim Konstruieren (Do und Gross 1996). Skizzen besitzen meist eine höhere Informationsdichte als textuelle Beschreibungen (Lemburg 2009). Sie können als initiale nicht-formalisierte Modellbildung und -nutzung betrachtet werden (Brun et al. 2018). Eine Untersuchung zeigt, dass die Anzahl erzeugter Skizzen in der Konzeptphase mit dem Erfolg der Gestaltung korreliert (Yang 2009). Ein Nachteil der fehlenden Formalisierung ist, dass freie Skizzen nicht eindeutig interpretierbar und dadurch häufig nur für ihren Ersteller nutzbar sind. Ihr Zweck ist zudem für Außenstehende nicht immer erkennbar, was ihre Wiederverwendbarkeit erschwert.

Organ Domain Models

Die Organ Domain Models sind Teil der Domain Theory, die von Andreasen (1980) auf Basis von Arbeiten von Hubka (1973) entwickelt wurde. In der Organ Domain werden funktionale Einheiten einer Produktgestalt (die Organe) beschrieben, durch die seine Funktionen ermöglicht werden. Modellbildung von Organen wird durch freie Skizzen oder auch technische Zeichnungen mit ergänzter textueller Funktionsbeschreibung gebildet. Ergänzend können noch Symbole zur Wirkungsweise hinzugefügt werden (beispielsweise Kraft- und Bewegungspfeile). Eine formale Modellsprache existiert jedoch in diesen Modellen nicht.

Modell nach Rihtaršič

Das Modell nach Rihtaršič baut auf Verkettung von physikalischen Wirkprinzipien und Basis-Wirkelementen auf und ist damit ähnlich zu Bondgraphen (siehe Abschnitt 2.3.2). In diesem Modell wird die Gestalt in Basiselemente zerlegt, die mit physikalischen Wirkprinzipien automatisiert zu einem funktionsfähigen Produkt kombiniert werden. Sein Ziel ist die Unterstützung der Konzeptionierung durch automatische Generierung von Lösungen aus definierten Anforderungen und Randbedingungen. Durch die notwendige Bewertung der entstandenen Lösungen soll auch die Kreativität in dieser Phase unterstützt werden (Rihtaršič et al. 2012). Dieses Modell besitzt formalisierte Elemente und kann automatisiert angewandt werden. Es

wird jedoch auch für wenig komplexe Systeme schnell umfangreich und erfordert eine umfangreiche Einarbeitung für seine Nutzer. Die Explizierung mentaler Modelle wird dadurch erschwert. Eine Anwendung in Entwicklungsprojekten des Unternehmensumfelds konnte nicht identifiziert werden.

Zusammenfassend sind in der Konzeptionierung genutzte Modelle meist wenig formalisiert, um Freiheiten bei der Explizierung der mentalen Modelle zu ermöglichen. Skizzenbasierte Modelle sind meist nicht eindeutig und dadurch schwierig interpretierbar, was die Wiederverwendbarkeit des in ihnen abliegenden Wissens erschwert. Die Bildung formalisierter Modelle zu diesem Zweck ist mit hohem Aufwand verbunden.

2.3.2 Produktdefinition

In der Produktdefinition sind Modelle eingeordnet, mit denen das Produkt parametrisiert und in die Fertigungsdokumentation oder quantitative Produktmodelle transferiert werden kann (Andreasen et al. 2015). Zu diesem Zweck wurden in einer Literaturstudie von Matthiesen et al. (2019a) die meisten qualitativen GFZ-Modelle identifiziert. Im Folgenden werden vier dieser Modelle beschrieben, die unterschiedliche Aspekte der Produktdefinition abbilden.

Bondgraphen

Bondgraphen sind grafische Modelle dynamischer physikalischer Systeme. Sie beinhalten Komponenten und Verknüpfungen. Jede Komponente besitzt Schnittstellen, an denen Fluss- und Potentialgrößen (flow and effort parameters) übertragen werden (Gawthrop und Bevan 2007). Ihr Verbreitungsschwerpunkt ist die Steuerungs- und Regelungstechnik, sie werden aber auch in der Gestaltung angewandt. Diese Modelle können mit Stift und Papier erstellt werden und sind somit für die erste Auslegung eines Systems und später als Basis für rechnerunterstützte Modelle geeignet. Sie werden auch mit Tool-Unterstützung im Übergang von Konzept zu Detailgestalt verwendet (Umeda und Tomiyama 1997).

Bondgraphen bieten eine formalisierte Beschreibung von GFZ technischer Systeme. Sie ermöglichen die Handhabung komplizierter Zusammenhänge, jedoch besitzen sie keine Möglichkeit, die definierte Gestalt und ihre Interaktion bei der Funktionserfüllung in einer realitätsnahen Darstellungsform zu visualisieren (Kontaktflächen und ihre Verbindung bleiben schematisch). Dadurch stoßen sie in Systemen, in denen wenig standardisierte Elemente verwendet werden, an ihre Grenzen.

Axiomatic Design Modelle

Axiomatic Design ist eine Methode der Produktentwicklung, die auch ein Modell zur Abbildung von GFZ beinhaltet. Ihr übergeordnetes Ziel ist die Zuordnung von Lösungen (Gestalt) zu vorher definierten Anforderungen (Funktion) unter Beachtung von zwei definierten Axiomen. Eine Diskussion dieser Axiome und auch des übergeordneten Prozessmodells ist nicht Thema dieser Forschungsarbeit, weshalb im Folgenden nur auf das GFZ-Modell des Axiomatic Design eingegangen wird. Dieses Modell besteht aus zwei Vektoren und einer Matrix. Ein Vektor beinhaltet die funktionalen Anforderungen (FRs) und der andere die Gestaltparameter (DPs) des sie erfüllenden Produkts. Die Matrix A beschreibt die (funktionsrelevante) Produktgestalt und hängt über die Beziehung $\{FRs\} = A \{DPs\}$ mit den Vektoren zusammen. (Suh 1998)

Das Axiomatic Design Modell unterstützt die Dokumentation von GFZ und kann auch zur Analyse und Bewertung bestehender Lösungen hinsichtlich der Axiome genutzt werden. Dieses Modell kann rechnerunterstützt eingesetzt und so zur Identifikation und Vereinfachung komplexer Abhängigkeiten genutzt werden. Eine Herausforderung ist die Identifikation der Gestaltparameter, die in den Vektor integriert werden. Diese müssen aus dem Systemverständnis heraus definiert werden, wobei zusätzliche explizite oder implizite Modelle notwendig sind.

Characteristics-Properties-Modelling CPM

Das CPM ist der Produktmodellierungsteil der Entwicklungsmethodik des CPM/PDD Ansatzes, der auf der Unterscheidung von *Merkmalen* (Characteristics) und *Eigenschaften* (Properties) eines Produkts aufbaut. In der Gestaltung können Merkmale direkt beeinflusst werden, während Eigenschaften abhängige Parameter darstellen, die nur indirekt beeinflusst werden können. Eigenschaften können dabei sowohl Verhalten (beispielsweise Beschleunigungsvermögen) als auch Gestalt (beispielsweise Volumen) abbilden. Merkmale sind in der Gestaltung in der Regel Gestaltmerkmale (beispielsweise Länge oder Durchmesser).

In der Modellbildung mit CPM wird das Analyse- und Synthesemodell unterschieden. Im Analysemodell werden die Eigenschaften aus Merkmalen unter der Annahme bestimmt, dass jede Eigenschaft unabhängig voneinander untersucht werden kann. So werden aus den gegebenen Merkmalen die relevanten Eigenschaften ermittelt. Hierbei finden verschiedene implizite und explizite Modelle und Methoden Anwendung, beispielsweise Expertenbefragung, Versuche mit physischen Modellen oder rechnerunterstützte Analysen. Das Synthesemodell entsteht aus der Umkehrung (Invertierung) des Analysemodells. Aus benötigten Eigenschaften werden

Merkmale definiert, die diese erfüllen können. Auch hier werden wieder verschiedene Modelle und Methoden angewandt, beispielsweise Intuition, Konstruktionskataloge und auch rechnerunterstützte Modelle. (Weber 2014)

Mittels CPM können GFZ durch die Verbindung von Merkmalen der Gestalt zu Eigenschaften (Funktion / Verhalten) strukturiert abgebildet werden. Diese Struktur unterstützt die Kombinationsmöglichkeit mit Gestaltmodellen wie beispielsweise CAD oder auch Modellen der Toleranzberechnungen (Malmiry et al. 2016). CPM beinhaltet selbst keine visualisierte Abbildung des Produkts und benötigt ähnlich wie das Axiomatic Design Modell weitere Modelle zur Identifikation von Eigenschaften und Merkmalen.

Graph-based Tolerancing

Das Graph-based Tolerancing ermöglicht die Betrachtung von Toleranzketten bereits früh in der Gestaltung, wenn das Produkt noch nicht in seinen Parametern definiert ist. Da die Funktionserfüllung durch die konstruktiven Details der Gestalt bestimmt wird (Matthesen 2017), ist eine frühe Betrachtung von Toleranzen in der Gestaltung wichtig. Dies bedingt die Notwendigkeit einer engen Verknüpfung von Toleranzbetrachtung und Gestaltung (Schleich et al. 2018; Srinivasan et al. 1996). Ein Modell, das diese Verknüpfung adressiert ist das Graph-based Tolerancing (Goetz et al. 2018). In diesem Modell wird auf Basis definierter Kontakte und Gelenke in einem Produktkonzept eine funktionsorientierte Toleranzkette erstellt, mit der anschließend die Bewertung des Konzepts hinsichtlich der Robustheit seiner Funktionserfüllung durchgeführt wird. Hierdurch wird eine Toleranzbetrachtung bereits auf Basis qualitativer Informationen möglich (Grauberger et al. 2020b).

Zusammenfassend haben Modelle zum Zweck der Produktdefinition meist eine hohe Formalisierung, was ihre Anschlussfähigkeit an quantitative Modelle unterstützt. Teilweise bieten sie eine schematische Systemvisualisierung und können damit neben der Abbildung von GFZ auch zu deren Identifikation in der Analyse genutzt werden. Gestaltparameter können hier abgebildet werden, jedoch sind Rückschlüsse auf die Entscheidung zu ihrer Abbildung nur mit zusätzlichen Modellen oder implizitem Erfahrungswissen möglich.

2.3.3 Wissensverwaltung

Zum Zweck der Wissensverwaltung werden Modelle genutzt, mit denen das Produkt strukturiert wird und mit denen Aktivitäten der Gestaltung koordiniert werden können (Andreasen et al. 2015).

Product Structure Modell

Das Product Structure Modell unterstützt die Zuordnung von Wissen aus verschiedenen Domänen der Produktentwicklung in einem Entwicklungsprojekt. Es beinhaltet eine Produktstruktur (Gestalt) und funktionale Anforderungen, die über spezifizierte Parameter verknüpft sind. Parallel zur Definition der Produktstruktur wird das Wissen in einem Modell abgelegt, das in folgenden Entwicklungsprojekten wiederverwendet werden kann. (Baxter et al. 2008)

Mit diesem Modell ist es möglich, Wissen zu GFZ aus vorigen Produkten wiederzuverwenden. Allerdings bleibt hier die Abbildung von GFZ für die Gestaltung schwer zugänglich, da die Domänen nicht in ein gemeinsames Modell überführt werden. So bleibt es notwendig, aus dem parametrisierten Gestaltmodell (beispielsweise ein CAD-Modell) über zusätzliche nicht formalisierte Dokumentation auf die Zusammenhänge mit den funktionalen Anforderungen zu schließen.

Produktstrukturmodell nach Langeveld

Das Produktstruktur-Modell nach Langeveld erweitert die Betrachtung der Produktstruktur über die Gestaltung hinaus, indem das Produkt auf fünf unterschiedlich abstrakten Ebenen (Produkt, Funktionale Einheiten, Unter-Baugruppen, Teile, Rohmaterialien). In diesem Modell werden zudem die Ebenen Funktion, Material, Geometrie und Herstellbarkeit verknüpft (Langeveld 2011). Allerdings bleibt die Beschreibung abstrakt und es werden keine weiterführenden Erläuterungen zur Modellbildung und -nutzung gegeben.

Zusammenfassend existieren in der Wissensverwaltung nur wenige Modelle, welche zur qualitativen Modellbildung von GFZ genutzt werden können. Diese haben eher übergeordneten Charakter und verwenden Ergebnisse aus anderen Modellen, welche durch sie strukturiert werden. Dadurch können sie zur Ordnung von bereits bestehendem explizitem Wissen zu GFZ genutzt werden, sofern es in geeigneten Modellen vorliegt. Die Explizierung von impliziten GFZ ist mit ihnen jedoch nicht möglich.

2.3.4 Erkenntnisgewinn

In der Kategorie Erkenntnisgewinn werden Modelle eingeordnet, deren Fokus darauf liegt, unbekanntes Verhalten des Produkts zu analysieren (Andreasen et al. 2015). Unter diese Kategorie fällt auch der C&C²-Ansatz, der als Grundlage dieser Forschungsarbeit in Kapitel 2.4 im Detail beschrieben wird.

Das Wirkraummodell

Das Wirkraummodell betrachtet qualitative GFZ im Hinblick auf die Analyse unerwünschter Funktionen. Es wurde für den Bereich des Hygienic Design entwickelt,

da dort bislang bestehende qualitative GFZ-Modelle die zu betrachtenden Zusammenhänge in der Untersuchung von Leckage und ähnlichen nicht vorhandenen Funktionen nicht ausreichend abbilden konnten. Es beinhaltet formalisierte visuelle Elemente, in denen die Produktgestalt mit Funktion und Verhalten verknüpft wird.

Das Wirkraummodell beinhaltet Wirkräume, welche durch Wirkraumflächen begrenzt sind. Über diese Wirkraumflächen können Stoff-, Energie- und Signalflüsse übertragen werden. Durch diese Flüsse können potentielle Nicht-Funktionen analysiert werden. Zum Wirkraummodell besteht auch eine Modellbildungsmethode in einem vierstufigen Prozess, in dem auf verschiedene Arten von Nicht-Funktionen geprüft wird. (Beetz und Kirchner 2019)

Das Kraftfluss-Modell

In der gezielten Erfassung von Systemverhalten kann eine Bewertung des qualitativen Verlaufs der gewünschten Zielgröße unterstützt werden. Das Kraftfluss-Modell nach Vogel et al. (2019) ermöglicht die visuelle Betrachtung von Lastpfaden in einem Systemabbild. Es fokussiert hierbei die Betrachtung von Verzweigungen und Überlagerungen aus Mess- und Störgrößen, welche die Erfassung der Zielgröße erschweren. Es nutzt Knoten im Lastpfad, an denen Bilanzgleichungen der Ziel-, Mess- und Störgrößen aufgestellt werden können. Diese ermöglichen beispielsweise die Bewertung der Eignung eines Messortes für die Sensorapplikation.

Zusammenfassend kann die Visualisierung der Systemgestalt als ein zentrales Element in Modellen zum Erkenntnisgewinn betrachtet werden. Im Gegensatz zu Modellen für die Konzeptionierung besitzen sie jedoch formalisierte Elemente, welche in diese Visualisierung integriert werden. Durch ihre starke Spezialisierung sind sie jedoch nur in bestimmten Situationen der Gestaltung zielführend anwendbar. Da eine Anschlussfähigkeit zu weiteren Modellen der Gestaltung nicht beschrieben ist, besteht hier eine Herausforderung darin, diese Modelle in die Modelllandschaft der Gestaltung einzubinden.

2.3.5 Zusammenfassung zu Modellen in der Gestaltung

Es zeigt sich, dass viele Produktmodelle für die Gestaltung genutzt werden, von denen ein Großteil in der Lage ist, Aspekte des GFZ abzubilden. Der Bedarf an qualitativen Modellen in Aufbau und Nutzung von quantitativ-rechnergestützten Modellen ist durch die beschriebene Relevanz von implizitem Expertenwissen vorhanden. Qualitative Modelle sind zumeist nicht direkt an die übrige Modelllandschaft der Gestaltung anschlussfähig und werden selten als Unterstützung im Aufbau quantitativer Modelle genutzt. Abhängig von ihrem Modellzweck zeigen qualitative Modelle unterschiedliche Herausforderungen und Forschungsbedarfe:

Tabelle 2-2: Stärken und Herausforderungen zu qualitativen Modellen der Gestaltung

Modell-zweck	Stärken der Modelle	Herausforderungen
Konzeptio-nierung	Sehr schlanke visuell unter-stützte Modellbildung ist möglich	Erschwerte Interpretation durch fehlende Formalisie-rung
Produktde-finition	Strukturierung von komplizierten und komplexen Systemen	Benötigen implizites Wissen zu GFZ, um zielführend auf-gebaut werden zu können
Wissens-verwaltung	Einbindung vieler Wissensdomä-nen	Modellbildung von GFZ wird nicht unterstützt (nur durch Einbindung weiterführender Modelle)
Erkenntnis-gewinn	Frühe Abbildung von GFZ, Visu-alisierung zur Unterstützung der mentalen Modellbildung	Schwierige Anschlussfähig-keit in der Modelllandschaft der Gestaltung durch hohe Spezialisierung

Übergeordneter Forschungsbedarf besteht darin, dass unklar bleibt, wie Erkennt-nisse zu GFZ mit diesen Modellen erzeugt und in der Gestaltung weiter genutzt werden. Detaillierter Forschungsbedarf zu wissenschaftlichen Aspekten der ge-nannten Modelle ist nicht im Fokus dieser Arbeit.

2.4 Der Contact and Channel Approach

Ein weiteres qualitatives Modell zum Zweck des Erkenntnisgewinns kann mit dem C&C²-Ansatz erstellt werden. Dieser bildet die Basis dieser Forschungsarbeit und wird deshalb im Folgenden detaillierter beschrieben.

Die folgende Beschreibung ist aus den Publikationen (Matthiesen et al. 2018a), (Matthiesen et al. 2018b) und (Matthiesen 2021) entnommen. Teile des Textes sind unverändert übernommen. Diese Beschreibung beinhaltet den zur Zeit der Finalisierung dieser Forschungsarbeit aktuellen Stand des C&C²-Ansatzes. Anpassungen und Erweiterungen dieses Ansatzes, die Teil dieser Forschungsarbeit sind, sind hier bereits integriert. Sie werden in Kapitel 5 beschrieben und sind hier nicht ge-sondert gekennzeichnet.

Der C&C²-Ansatz kann als Metamodell zur Erstellung von Modellen des GFZ betrachtet werden. Ein Metamodell beinhaltet Modellelemente und Grundregeln zu seiner Bildung (Stachowiak 1973). Er wurde als Denkzeug für die Gestaltung entwickelt, um die Explizierung von mentalen Modellen des GFZ zu unterstützen (Albers und Matthiesen 2002; Matthiesen 2002). In der ersten Zeit seiner Entwicklung wurde er als Elementmodell bezeichnet, welches die Kernelemente Wirkflächenpaar (WFP) und Leitstützstruktur (LSS) sowie die drei Grundhypothesen beinhaltet. Ab 2004 wurde er als Contact and Channel Model (C&CM) bezeichnet. 2010 wurde der Connector als drittes Kernelement hinzugefügt und der Ansatz und das Modell begrifflich getrennt. Der Ansatz wird seitdem als C&C²-Ansatz bezeichnet, das Modell als C&C²-Modell (vgl. auch Kapitel 4.2 und Grauberger, Wessels et al. (2020d).

Im Rahmen der Erstellung des Gestaltungskapitels der 9. Auflage des Pahl/Beitz (Matthiesen 2021) fanden Expertenworkshops zur Überarbeitung des C&C²-Ansatzes statt. Hierbei wurden Definitionen und auch die Struktur seiner Elemente überarbeitet. Hierbei wurden die Elemente des C&C²-Ansatzes in Kern-, Neben- und Strukturelemente unterteilt: Zur Hervorhebung des Paarcharakters wurde die Definition des Wirkflächenpaars von der Wirkfläche entkoppelt. Die Wirkfläche ist nun als Teil des Wirkflächenpaars definiert. Der Wirkkontakt als Element wurde abgeschafft, da er von seiner Charakteristik einem WFP auf der nächsttieferen Detailstufe entspricht. Da der C&C²-Ansatz fraktal ist (Grundhypothese 3, siehe auch Kapitel 2.4.1) besteht keine Notwendigkeit seiner Definition¹. (Matthiesen et al. 2018a)

Die Ergebnisse dieser Überarbeitung wurden grafisch aufbereitet (vgl. Abbildung 2-4 und Abbildung 2-6 in Kapitel 2.4) und in einem Whitepaper publiziert (Matthiesen et al. 2018a). Dieser Stand des C&C²-Ansatzes wird im Folgenden detailliert beschrieben.

2.4.1 Kernelemente und Grundhypothesen

Der C&C²-Ansatz besteht aus den drei Kernelementen Wirkflächenpaar (WFP), Leitstützstruktur (LSS) und Connector (C), sowie drei Grundhypothesen und einem beliebig wählbaren visuellen Abbild der Gestalt (Matthiesen et al. 2018b). Eine Übersicht über den C&C²-Ansatz ist in Abbildung 2-4 dargestellt.

¹ Ständige Teilnehmer des Expertenworkshops waren Sven Matthiesen und Patric Grauberger. Wechselnde Teilnehmer waren wissenschaftliche Mitarbeiter des IPEK – Institut für Produktentwicklung aus den Forschungsgruppen des Lehrstuhls für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente

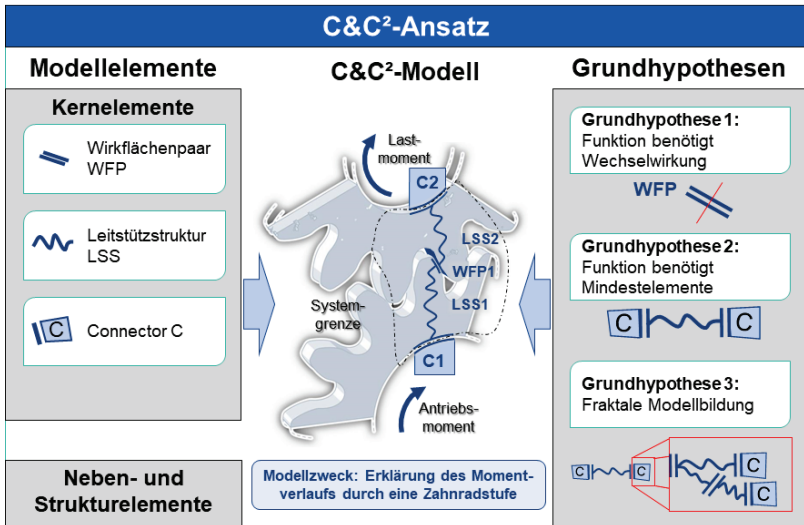


Abbildung 2-4: Übersicht des C&C²-Ansatzes nach (Matthiesen et al. 2018b; Matthiesen et al. 2018a)

Im Folgenden werden die Definitionen dieser Elemente nach Matthiesen (2021) beschrieben:

- WFP sind Flächenelemente. Sie werden gebildet, wenn zwei beliebig geformte Oberflächen fester Körper oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern in Kontakt treten und am Energie-, Stoff- und/oder Informationsaustausch beteiligt sind.
- LSS sind Volumenelemente. Sie beschreiben Volumina von festen Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzten Räumen, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und eine Leitung von Stoff, Energie und/oder Information zwischen ihnen ermöglichen.
- Connectoren integrieren die wirkungsrelevanten Eigenschaften, die außerhalb des Gestaltungsbereichs liegen, in die Systembetrachtung. Sie sind eine für die Beschreibung der betrachteten Funktion relevante Abstraktion der Systemumgebung. Connectoren haben eine repräsentative Wirkfläche und ein damit verknüpftes Modell der relevanten Systemumgebung und liegen damit im Betrachtungsraum aber nicht im aktuellen Gestaltungsraum.

Die Grundhypothesen sind wie folgt definiert:

- Grundhypothese 1: Funktion braucht Wechselwirkung. Jedes funktionsrelevante Element eines technischen Systems ist an der Funktionserfüllung durch Wechselwirkungen mit mindestens einem anderen funktionsrelevanten Element beteiligt. Wechselwirkungen finden nur statt bei Kontakt von Wirkflächen (WF), die gemeinsam Wirkflächenpaare (WFP) bilden.
- Grundhypothese 2: Funktion braucht Mindestelemente. Eine Funktion erfordert mindestens zwei Wirkflächenpaare (WFP), die durch eine Leitstützstruktur (LSS) verbunden sind, und durch jeweils einen Connector (C) in die Umgebung eingebunden sind. Funktionsbestimmend sind dabei die Merkmale, Eigenschaften und Wechselwirkungen der Wirkflächenpaare, der Leitstützstrukturen und der Connectoren.
- Grundhypothese 3: Fraktaler Charakter der Modellbildung. Jedes Teilsystem kann mit den Gestaltfunktionselementen Wirkflächenpaar (WFP), Leitstützstruktur (LSS) und Connector (C) auf verschiedenen Abstraktions- und Detaillierungsstufen beschrieben werden. Dazu ist eine Variation der Anzahl, der Anordnung und/oder der Eigenschaften der dargestellten Gestaltfunktionselemente erforderlich.

Das C&C²-Modell wird durch die Integration der Kernelemente unter Berücksichtigung der Grundhypothesen in ein frei wählbares Systemabbild erstellt. In diesem Systemabbild muss jedoch eine Gestalt des technischen Systems abgebildet sein. Beispiele hierfür sind Skizzen, Fotos, CAD-Modelle oder technische Zeichnungen. Der C&C²-Ansatz nutzt damit die Vorteile der visuellen Systemabbildung, wie sie beispielsweise Westmoreland et al. beschreiben (2011). Eine Betrachtung ausgehend von Funktionsbäumen (vgl. Atilola et al. (2016)) ist in der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz nicht vorgesehen.

In den Kernelementen werden Parameter definiert, durch die das Systemverhalten beeinflusst wird. Diese Parameter werden in Eigenschaften und Merkmale unterteilt. Eigenschaften können in der Konstruktion nur indirekt durch die Merkmale verändert werden (beispielsweise das Volumen als Eigenschaft durch die Merkmale Länge, Breite und Höhe). Ziel der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz ist es häufig, die funktionskritischen Merkmale in den Kernelementen zu identifizieren und dadurch konstruktionsfähig zu werden. Ein Beispiel für die Modellbildung verschiedener Parameter in einem C&C²-Modell ist in Abbildung 2-5 dargestellt.

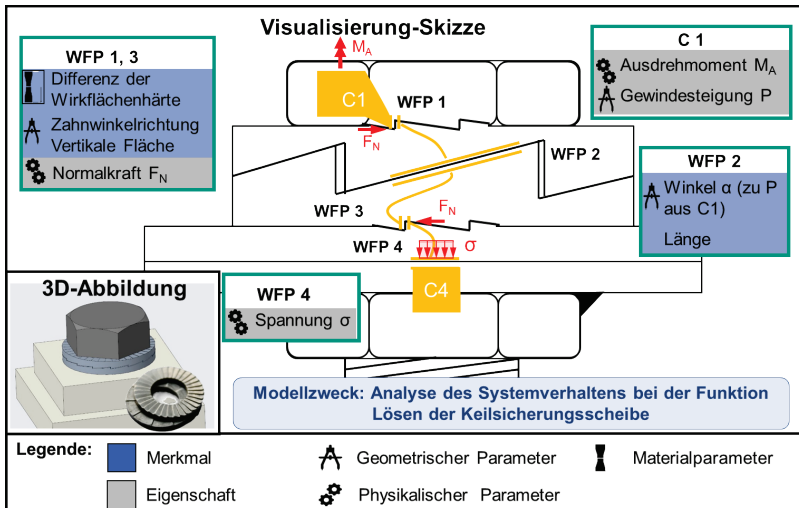


Abbildung 2-5: Darstellung von Parametern in einem C&C²-Modell einer Keilsicherungsscheibe (vgl. auch Kapitel 5.2.1) angelehnt an eine gemeinsame Ausarbeitung im Rahmen der Abschlussarbeit Skowaisa (2020)

2.4.2 Neben- und Strukturelemente

Zusätzlich zu den Kernelementen existieren Neben- und Strukturelemente, die in speziellen Fällen der Modellbildung genutzt werden können. Diese werden in (Matthiesen 2021) wie folgt definiert:

Nebenelemente sind Elemente, die nicht in jedem C&C²-Modell notwendig sind aber insbesondere in der Synthese wichtig sein können.

- Wirkflächen (WF) sind Oberflächen fester Körper oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise in Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und dann ein Wirkflächenpaar bilden.
- Begrenzungsflächen (BS) sind Oberflächen fester Körper oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die keine Wirkflächen sind.

- Reststrukturen (RS) sind Volumina von festen Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzte Räume, die nicht zur Leitstützstruktur werden.

Strukturelemente sind Elemente, die schwerpunktmäßig in der Nutzung des C&C²-Ansatzes zur Wissensverwaltung genutzt werden.

- Die Tragstruktur (TS) beschreibt die Menge der betrachteten Leitstützstrukturen. Sie wird benötigt, wenn die Leitstützstrukturen aus unterschiedlichen C&C²-Modellen des zu entwickelnden Produktes berücksichtigt werden müssen. Dieses ist der Fall, wenn unterschiedliche Anwendungsfälle und Zustände für die Gestaltung relevant sind.
- Das Wirknetz beschreibt die Summe der im C&C²-Modell abgebildeten Gestaltfunktionselemente innerhalb eines Zustands des Produktes. Ein C&C²-Modell beinhaltet immer genau ein Wirknetz.
- Die Wirkstruktur ist die Summe der modellierten Wirknetze in einem Produkt. Sie beinhaltet alle modellierten Gestaltfunktionselemente. Damit ist sie entscheidend für die Funktionserfüllung des gestalteten Produktes. Die Wirkstruktur kann aus vielen einzelnen C&C²-Modellen unterschiedlicher Detaillierung und verschiedener Zustände bestehen. Sie wird in der Regel durch ein C&C²-Sequenzmodell abgebildet.

In Abbildung 2-6 ist die Struktur der Elemente des C&C²-Ansatz dargestellt.

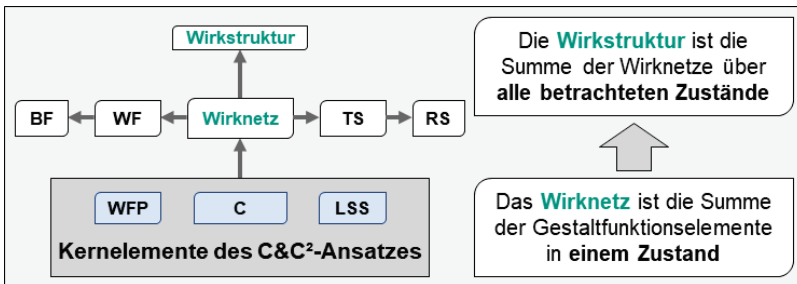


Abbildung 2-6: Struktur der Elemente des C&C²-Ansatz (Matthiesen et al. 2018a)

2.4.3 Zustandsbetrachtung – C&C²-Sequenzmodell

Da einzelne C&C²-Modelle nur statische Zustände abbilden können, GFZ jedoch häufig zustandsübergreifend auftreten, wurde das C&C²-Sequenzmodell entwickelt, das einzelne statische C&C²-Modelle verknüpft und dadurch Zustandsänderungen

abbildbar macht (Albers et al. 2008a). Um seine Anwendungsmöglichkeiten zu erweitern, wurden logische Zustände als Dimension integriert (Matthiesen und Ruckpaul 2012). Es bestehen folgende Dimensionen des C&C²-Sequenzmodells:

- Zustand des Systems: Der zeitliche Zustand, in dem sich das System befindet, wenn das C&C²-Modell gültig ist. Dieser Zustand kann auch durch zeitabhängige Größen wie Drehwinkel oder linearer Weg einer Komponente bestimmt sein.
- Detail-Betrachtungsebene: Da C&C²-Modelle fraktal sind (vgl. 2. Grundhypothese), können verschiedene Betrachtungsebenen in der Modellbildung eingenommen werden. Beispielsweise kann eine Gesamtsystem-, Teilsystem- und Komponentendetailbetrachtung modelliert und über diese Dimension verknüpft werden.
- Ort der Funktionserfüllung (OdF): In einigen Systemen existieren mehrere Bereiche, in denen GFZ betrachtet werden müssen. Beispielsweise kann ein OdF in einem Getriebe an einem Lager der Eingangswelle liegen, ein anderer im Bereich des Zahneingriffs zwischen Ein- und Ausgangswelle. Zusammenhänge zwischen diesen OdF können so verknüpft werden.
- Logischer Zustand: In einem System können sich Zustände nicht nur in einer zeitlichen Abfolge ändern, sondern auch durch Einwirkung eines Schaltungsmechanismus. Dieser kann gewollt sein (Sicherheitsmechanismus) oder statistisch auftreten (Versagen einer LSS aufgrund eines Fertigungs- ausreißers).
- Perspektive: Jedes C&C²-Modell bildet ein technisches System aus einer bestimmten Perspektive ab. Für die Nachvollziehbarkeit eines C&C²-Sequenzmodells ist es wichtig, die Perspektive zu dokumentieren, falls sie nicht intuitiv erkennbar ist. Ein Perspektivenwechsel kann als Technik in der Analyse beim Verständnis von GFZ unterstützen.

Beispiele für verschiedene Anwendungsfälle von C&C²-Sequenzmodelle finden sich in folgenden Forschungsarbeiten: (Albers et al. 2016b; Matthiesen et al. 2017b; Matthiesen et al. 2018b; Matthiesen et al. 2019b; Thau 2013).

2.4.4 Zusammenfassung und Forschungsbedarf im C&C²-Ansatz

Der C&C²-Ansatz bildet GFZ durch seine Kernelemente qualitativ und visuell in statischen C&C²-Modellen ab. Quasistatische und eingeschränkt auch dynamische Systemzustände können über das C&C²-Sequenzmodell modelliert werden.

Eine Übersicht über die im C&C²-Ansatz vorhandenen Elemente und Aspekte ist in Abbildung 2-7 dargestellt (vgl. auch (Grauberger et al. 2020d; Matthiesen et al. 2018a)).

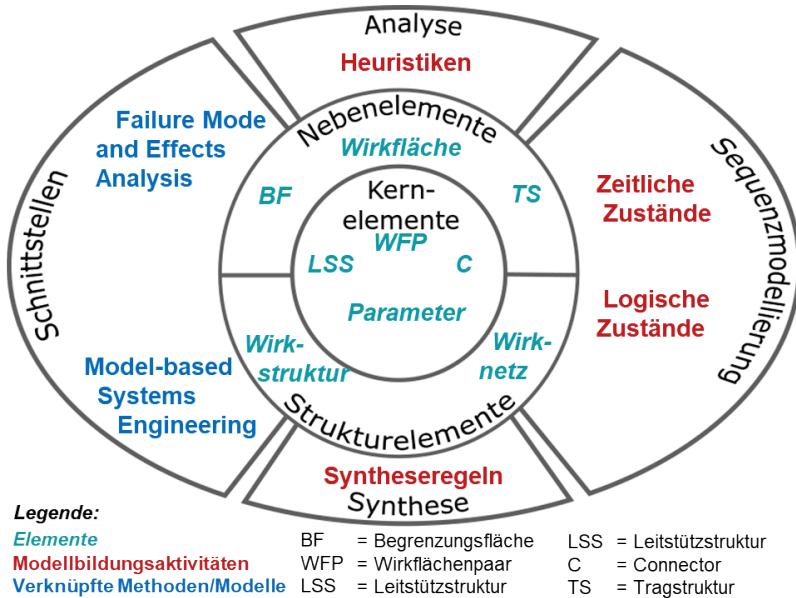


Abbildung 2-7: Elemente und Aspekte des C&C²-Ansatzes

Hier sind zentral die Kernelemente mit den in ihnen vorhandenen Parametern dargestellt. Darum sind die Neben- und Strukturelemente angeordnet. Im äußeren Ring sind die Aspekte Analyse, Sequenzmodellierung und Synthese sowie die Schnittstellen zu weiteren Modellen und Methoden der Produktentwicklung dargestellt. Aspekte beinhalten Methoden und Elemente für spezielle Aktivitäten in der Nutzung des C&C²-Ansatzes.

Forschungsbedarf besteht darin, dass größtenteils unklar ist, wie und wo der C&C²-Ansatz in der Gestaltung eingesetzt wird. Es können aktuell keine Aussagen darüber getroffen werden, wie genau welche seiner Elemente oder Struktur beim Aufbau von Systemverständnis in der Gestaltung unterstützen.

2.5 Modellbildungsmethoden der Gestaltung

Jedes Modell ist nur dann in der Gestaltung hilfreich, wenn es seinem Zweck entsprechend aufgebaut werden kann. Im Folgenden werden Herausforderungen und Vorgehensweisen zur Modellbildung in der Gestaltung beschrieben. Das Vorgehen zur Bildung von C&C²-Modellen wird abschließend detailliert beschrieben.

2.5.1 Relevanz der Modellbildung in der Gestaltung

Jedes Modell der Gestaltung basiert zumindest teilweise auf impliziten Gedankenmodellen seiner Ersteller. Der Beginn der Modellbildung auf Basis dieser Gedankenmodelle wird als höchst relevant bezeichnet, beispielsweise benennen Siebertz et al. (2017) die Definition von geeigneten Systemgrenzen und Qualitätsmerkmalen als entscheidend für den Erfolg späterer (statistischer) Modellbildung. Nach Vajna et al. gibt es „für die Herleitung eines einfachen, effizienten und gültigen Modells [...] keine allgemeingültigen Regeln, daher spielen Erfahrung und Vorwissen dabei eine große Rolle.“ (2018, S. 131). Die Einbindung von Experten in den Modelllaufbau ist entscheidend (Renger et al. 2008). Die Explizierung von mentalen Modellvorstellungen zu GFZ durch Dokumentation zeigte in einem Studierenden-Semesterprojekt auch ohne eingebundene Experten einen positiven Einfluss auf die erfolgreiche Umsetzung einer Funktion in der Produktgestalt (Grauberger et al. 2019). Eine Herausforderung in der Modellbildung besteht darin, dass verschiedene Akteure keine gemeinsame Sprache finden, um ihr Wissen zu einem Modell zusammenführen zu können (Hill und Levenhagen 1995).

2.5.2 Modellbildungsmethoden

Der überwiegende Anteil an Modellbildungsmethoden existiert zu quantitativen, ausführbaren Modellen, die tendenziell einen hohen Modellbildungsaufwand erfordern. Sie existieren auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen. Auf hoher Abstraktionsstufe werden allgemeine Vorgehen beschrieben, die kein spezifisches Modell adressieren. Beispiele sind das MoSim Schema (Günther und Velten 2014), das Vorgehen zum Aufbau von Berechnungsmodellen nach der VDI2211 (VDI 2211:2003-03 Blatt 2) oder das Meta-Modelling nach Simpson et al. (2001). Diese Vorgehensweisen sind modellübergreifend gültig, bieten jedoch wenig konkrete Hilfestellungen für einzelne Teilschritte der Modellbildung.

Spezifischere Modellbildungsmethoden adressieren eine bestimmte Art von Modellen. Sie bieten eine konkretere Hilfestellung, die allerdings mit einer eingeschränkten Gültigkeit einhergeht. Beispielsweise können dies Konstruktionsstrategien zum Aufbau parametrisierter CAD-Modelle sein. Sie werden häufig in Lehrbüchern detailliert beschrieben (Feldhusen und Grote 2013; Vajna et al. 2018).

Noch konkretere Vorgehensweisen adressieren die Implementierung einer bestimmten Ausprägung eines Modells in einem Tool. Beispiele sind Tutorials zur Erstellung von Elementen in einer spezifischen CAD-Umgebung wie die Erstellung von Federn in PTC Creo (Haas 2020). Diese Vorgehensweisen haben oft einen prozessartigen Charakter und eine geringe Übertragbarkeit auf andere Modelle.

Zu qualitativen Modellen existieren ebenfalls explizite Modellbildungsmethoden. Am Beispiel der Design Structure Matrix (DSM) wird eine Methode zur Modellbildung in einem Lehrbuch beschrieben (Eppinger und Browning 2012). Es werden Anwendungsbereiche von DSM beschrieben und zu jedem Bereich Vorgehensweisen und Beispiele vorgestellt. Das Wirkraummodell besitzt einen Ablaufplan zur Modellerstellung (Beetz und Kirchner 2019). Zu vielen Modellen findet sich jedoch keine explizite Modellbildungsmethode. Dies wirkt sich nachteilig auf die Anwendbarkeit und damit die Verbreitung dieser Modelle aus, da sie nicht unabhängig von Expertenunterstützung genutzt werden können. Am Beispiel des CPM zeigt eine Fallstudie die Notwendigkeit dieser Art der Produktmodellierung, jedoch wurde keine Anwendung des CPM in Unternehmen identifiziert. Es existieren jedoch ähnliche Modelle, die unternehmensspezifisch erstellt wurden (Erbe 2018).

In der Erstellung von Modellbildungsmethoden für qualitative Modelle tritt ein Zielkonflikt zwischen formalisiertem Modell und flexibler Anwendbarkeit auf, da ein großer Teil von Modellbildungs- und Analysetätigkeiten unter Nutzung von nicht-formalisierten Modellen stattfindet (Subrahmanian et al. 1993). Eine Formalisierung bringt den Vorteil einer Automatisierbarkeit der Modellerstellung und -verifikation. Jedoch kann mit einem formalisierten Modell häufig nicht exakt die Intention des Modellbildners abbilden (Albers et al. 2011a). Zudem steigt mit der Formalisierung meist auch der Aufwand in der Modellerstellung.

Qualitative Modelle, die mit geringem Aufwand aus dem mentalen Modell ihrer Ersteller abgeleitet werden können, sind zumeist kaum formalisiert, um größtmögliche Kreativität zu ermöglichen (beispielsweise freie Skizzen oder Organ Domain Models). Zu diesen Modellen existiert meist keine explizite Modellbildungsmethode. Zu freien Skizzen existieren Weiterbildungsmaßnahmen und auch Studien (bspw. (Hilton et al. 2016)), jedoch haben diese den Modellzweck der Konzeptionierung im

Fokus und unterstützen dadurch die kreative Ideenvisualisierung und nicht den Erkenntnisgewinn zu GFZ.

2.5.3 Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz

C&C²-Modelle können ähnlich wie die Organ Domain Models nach Andreasen et al. (2015) ebenfalls auf Skizzen basieren und dadurch flexibel und auch früh in der Konzeptphase genutzt werden. Durch ihre formalisierten Kernelemente ist es jedoch möglich, explizite Modellbildungsmethoden abzuleiten. Es existieren zwei methodische Vorgehensweisen, eine zur Analyse und eine zur Synthese. Das Vorgehen in der Analyse umfasst sieben Schritte, die aufeinander aufbauen, aber auch iterativ ablaufen können. Diese Schritte sind in Abbildung 2-8 dargestellt und werden im Folgenden kurz erläutert.

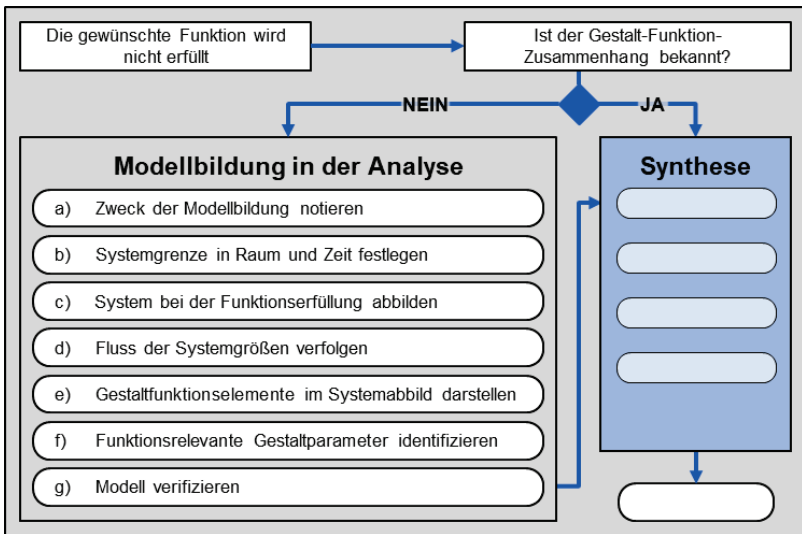


Abbildung 2-8: Vorgehen zur Bildung von C&C²-Modellen in der Analyse (Matthiesen et al. 2018a)

- a) Jedes C&C²-Modell wird seinem Zweck entsprechend erstellt. Der Zweck beschreibt das Ziel des Modellbildners und sollte im Modell notiert werden, um den Gültigkeitsbereich nachvollziehbar zu machen.

- b) Jedes Modell bildet einen Ausschnitt der Realität ab. Im Aufbau von C&C²-Modellen wird dieser Ausschnitt in den Dimensionen Raum und Zeit festgelegt werden.
- c) Ein geeignetes Abbild des Systems, in dem Interaktionen seiner Komponenten bei der Funktionserfüllung erkennbar sind, wird identifiziert.
- d) Die funktionsrelevanten Energie-, Stoff- und Informationsflüsse im analysierten System verlaufen durch die Kernelemente des C&C²-Ansatz.
- e) Die Kernelemente werden identifiziert und in das in c) erstellte Abbild des Systems unter Beachtung der Grundhypothesen integriert.
- f) Die Gestaltparameter (Merkmale und Eigenschaften) in den Kernelementen werden identifiziert, indem Annahmen zu ihrer Relevanz für die Funktionserfüllung getroffen werden. Diese Annahmen zu GFZ können auch als Hypothesen aufgestellt werden.
- g) Die im Modell abgebildeten GFZ sind zunächst nicht verifiziert. Der Abgleich mit der Realität ist notwendig, um zu prüfen, ob das Modell die Zusammenhänge korrekt abbildet. Durch diesen Schritt werden aus modellierten Vermutungen Erkenntnisse zu GFZ erzeugt.

Die Modellbildung in der Analyse ist abgeschlossen, wenn der GFZ ausreichend verstanden ist, d. h. wenn Merkmale gefunden sind, welche die Funktion beeinflussen. Dann kann mit einer Synthese begonnen werden, in der diese verstandenen Gestalt-Funktion-Zusammenhänge genutzt werden, um eine Gestalt zu entwickeln, die in der Lage ist, die Funktion zu erfüllen. (Matthiesen 2021)

In der Synthese besteht das Vorgehen zur Nutzung der erstellten Modelle in vier Schritten, die in Abbildung 2-9 dargestellt sind.

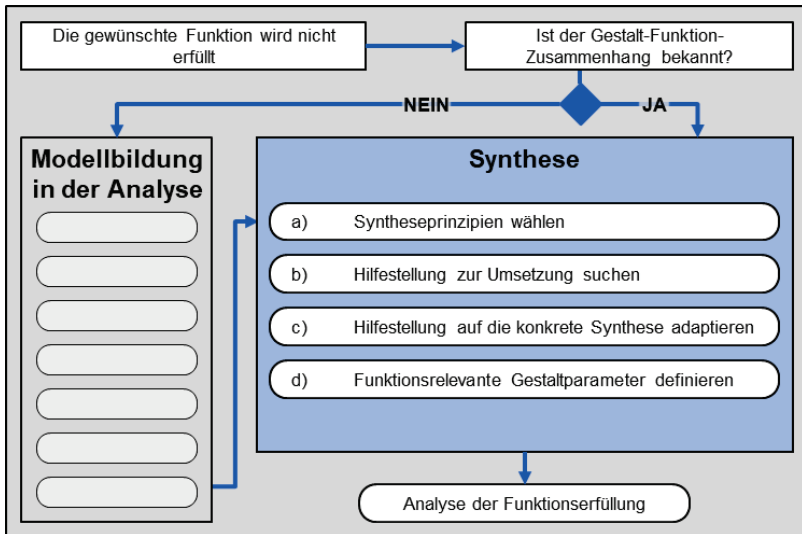


Abbildung 2-9: Vorgehen zur Bildung von C&C²-Modellen in der Synthese (Matthiesen et al. 2018a)

In der Synthese kann die Modellbildung nach den folgenden Schritten ablaufen, die ebenfalls nicht sequenziell durchlaufen werden müssen.

- a) In der Synthese gibt es ausschließlich drei prinzipielle Möglichkeiten, zu gestalten. Wirkflächenpaare oder Leitstützstrukturen können hinzugefügt, entfernt oder in ihren Eigenschaften verändert werden. Auf Basis der erkannten GFZ aus der Analyse werden Ideen dazu gesammelt, wie die zu synthetisierende Gestalt aussehen könnte.
- b) Geeignete Gestaltungsprinzipien und Richtlinien für die durchzuführende Synthese können helfen, eine Gestalt zu finden, die eine gewünschte Funktion ausreichend erfüllen kann.
- c) Die allgemeingültigen Gestaltungsprinzipien müssen auf die konkrete Synthese adaptiert werden, sie benötigen zusätzlich zur Funktion, die sie beinhalten, eine Verknüpfung zur Gestalt des Produktes. Auch die konkreteren Richtlinien müssen häufig noch in die tatsächlich stattfindende Synthese übersetzt werden.

- d) Die Definition von Merkmalen und damit der abhängigen Eigenschaften in den Kernelementen ist der Kern der Synthese. Hier wird das Produkt in seiner Gestalt definiert.

Nach jeder Synthese erfolgt wieder ein Analyseschritt, in dem überprüft wird, ob das Produkt die gewünschte Funktion auch erfüllt. (Matthiesen 2021)

Die Modellbildung in der Synthese basiert dabei auf einem mit der Modellbildungsmethode der Analyse erstellten C&C²-Modell. Sie beinhaltet Schritte zur Modellnutzung, die konkrete Modellbildung erfolgt nach der Methode der Analyse.

2.5.4 Zusammenfassung zu Modellbildungsmethoden der Gestaltung

Die Modellbildung in der Gestaltung basiert stark auf Erfahrungswissen von Experten. Modellbildungsmethoden existieren schwerpunktmäßig zu quantitativen Modellen, wohingegen qualitative Modelle meist intuitiv oder auf Basis ihrer Beschreibung gebildet werden. Zum C&C²-Ansatz existieren zwei Modellbildungsmethoden für die Analyse und Synthese, wobei die konkrete Modellbildung in der Analyse stattfindet.

Forschungsbedarf besteht hier darin, dass für qualitative Modelle kaum Modellbildungsmethoden vorliegen, wodurch ihre Anwendbarkeit in der Gestaltung erschwert wird. Zur Erforschung dieser Modellbildungsmethoden liegen kaum Referenzen zur vor. Dadurch bleibt unklar, wie diese Methoden entwickelt werden können und in welcher Form sie einen Mehrwert bieten können.

2.6 Vermittlung von Modellen und Methoden – Erkenntnisse der Bildungsforschung

Um Modelle und Methoden zielführend anwenden zu können, muss sichergestellt sein, dass die jeweilige Zielgruppe den Umgang mit ihnen ausreichend beherrschen kann. Die Form, in der Modelle und Methoden erlernt werden, ist dabei ein entscheidender Faktor für ihre erfolgreiche Anwendung. Bislang werden Erkenntnisse aus der Bildungsforschung in der Forschung an Modellen und Methoden zur Produktentwicklung noch wenig berücksichtigt. Es existieren jedoch Ansätze, um Modellbildungsmethoden im Rahmen der allgemeinen wissenschaftlichen Arbeit erfolgreich zu vermitteln (Chiu und Lin 2019). Hier wird insbesondere der Einfluss der praktischen „hands-on“ Modellbildung betont.

2.6.1 Didaktische Konzepte

Allgemein werden zur Strukturierung von Lehreinheiten didaktische Konzepte genutzt. Ein häufig verwendetes didaktisches Konzept ist das „Constructive Alignment“ nach Biggs (1996). Es adressiert den Zielkonflikt zwischen Lehrenden, welche Lehreinheiten vom Inhalt ausgehend erstellen, und Lernenden, welche häufig von den Anforderungen der Prüfungsleistung ausgehen. Es unterstützt dabei, Lernziele, -methoden und Prüfungsformen aneinander anzugleichen und ermöglicht eine kompetenzorientierte Lehre (Schaper et al. 2012).

Um Strukturen von Lehreinheiten im Detail zu betrachten, werden Taxonomien genutzt. Diese lassen eine Klassifikation der Lehrinhalte nach deren kognitiver Niveaustufe zu und unterstützen das Ziel einer lernerfolgsorientierten Struktur der Lehreinheit. Eine Möglichkeit, die vermittelten Lehrinhalte zu bewerten, bietet die Bloom'sche Taxonomie (Bloom 1956). Diese beinhaltet eine Liste von sechs Bildungszielen, die aufsteigend nach kognitiver Niveaustufe sortiert sind. Sie sind in Tabelle 2-3 dargestellt.

Tabelle 2-3: Kognitive Niveaustufen nach der Bloom'schen Taxonomie (Bloom 1956)

Kognitive Niveaustufe	Erläuterung
Wissen	Fakten, Methoden, Prozesse, Muster oder Strukturen können wiedergegeben werden.
Verständnis	Das Verständnis des kommunizierten Inhalts ist vorhanden, eine Übertragbarkeit jedoch nicht zwangsläufig gegeben.
Anwendung	Die Nutzung von Abstraktionen des Gelernten ist in spezifischen Situationen möglich.
Analyse	Strukturen und Beziehungen von Elementen des kommunizierten Inhalts werden erkannt.
Synthese	Restrukturierung/Kombination Elemente zu einem neuen System ist möglich.
Beurteilung	Eine Bewertung des Gelernten bezüglich eines gegebenen Zwecks ist möglich.

Die in der Bildungsforschung vorhandenen Erkenntnissen zur inhaltlichen und prozessualen Struktur sowie Einflussgrößen auf den Lernerfolg können den Aufbau von Schulungen zur Vermittlung von Modellen und Methoden der Produktentwicklungsforschung unterstützen.

Forschungsbedarf besteht hier darin, die vorhandenen Erkenntnisse der Bildungsforschung auf die Vermittlung von Modellbildungsmethoden der Gestaltung zu übertragen.

2.6.2 Einflussfaktoren auf den Lernerfolg

In der Vermittlung von Lerninhalten können 20 Grundformen didaktischer Unterrichts- und Arbeitsmodelle unterschieden werden, beispielsweise der Frontalunterricht, das Kleingruppen-Lerngespräch und die Vorlesung (Flechsig 1996). In der aktuellen Bildungsforschung liegt der Fokus auf der gezielten Förderung des Lernerfolgs durch geeignete Elemente und Struktur von Lehreinheiten (Kaufmann und Eggensperger 2017). Um den Einfluss von Lehreinheitselementen auf den Lernerfolg zu erfassen, wurden in der sogenannten „Hattie-Studie“ (Hattie 2010) die Ergebnisse aus über 800 internationalen Meta-Analysen, bestehend aus über 50.000 Einzelstudien mit etwa 250 Millionen teilnehmenden Lernenden, zusammengefasst. Aus dieser Datenbasis wurden 138 Einflussfaktoren auf den Lernerfolg ermittelt.

Beispielsweise hat der zeitliche Verlauf einer Lerneinheit Einfluss auf den Lernerfolg. Beobachtungen zeigen, dass die Aufmerksamkeit der Lernenden nach 10 bis 15 Minuten stark sinkt (Wilson und Korn 2007). Eine weitere Untersuchung zeigt, dass es innerhalb einer Vorlesung zu Zyklen mit abwechselnd hoher und niedriger Aufmerksamkeit der Lernenden kommt (Bunce et al. 2010). Eine mögliche Ursache ist das sogenannte Gedankenwandern, das im Fachgebiet der Lernpsychologie untersucht wurde. Es wird als ein Zustand der Entkopplung bei der Informationsverarbeitung beschrieben, die aufgrund einer Verlagerung der Aufmerksamkeit weg von der unmittelbaren Umgebung erfolgt (Smallwood und Schooler 2006, S. 956). Das Auftreten von Gedankenwandern steigt mit dem Zeitverlauf einer Lerneinheit, wodurch die Aufnahme der vermittelten Inhalte nachlässt (Risko et al. 2012).

Um Gedankenwandern zu verhindern, kann eine Struktur der Lerneinheit unterstützen, welche die Lernenden nicht überlastet, aber immer wieder aktiviert. Als didaktisches Lehreinheitskonzept eignet sich insbesondere das sogenannte Sandwich-Prinzip, welches auf dem systematischen Wechsel von kollektiven Vermittlungsphasen mit hoher Informationsdichte und individuellen Verarbeitungsphasen des Gelernten basiert (Kaufmann und Eggensperger 2017). Während kollektive Vermittlungsphasen aus theoretischem Input in Form eines Vortrags des Lehrenden bestehen, bieten die individuellen Verarbeitungsphasen ein hohes Maß an aktiven Gestaltungsmöglichkeiten. Zu nennen sind hier interaktive Arbeitsaufträge, Diskussionen, Partner- und Gruppenarbeiten. Dabei sind Anzahl und Länge der Phasen variabel und lassen sich abhängig vom Inhalt der Lehreinheit, den Lehr-Lernzielen,

der Dauer der Veranstaltung und der Größe der Zielgruppe gestalten (Greifeneder et al. 2012).

2.7 Validierung von Modellbildungsmethoden

Um sicherzustellen, dass eine zielführende Modellbildung und -nutzung möglich ist, sind Erkenntnisse über den Erfolg des Einsatzes von Modellen und Modellbildungsmethoden notwendig. Zentrales Element in Untersuchungen der Forschung zur Produktentwicklung sind daher die Erfolgskriterien entwickelter Modelle und Methoden. Nach Üreten et al. (2019) können die drei übergeordneten Kriterien Nutzen, Anwendbarkeit und Akzeptanz unterschieden werden. Hierbei bildet die Anwendbarkeit die Basis für jede Methodennutzung. Erst wenn die Anwendbarkeit sichergestellt ist, kann der Nutzen untersucht werden. Die Akzeptanz spielt insbesondere beim Übertrag in das Unternehmensumfeld eine Rolle, in dem die Methode ihre Anwender überzeugen muss.

Der Untersuchung von Modellbildungsmethoden in Probandenstudien kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Ohne Modellbildungsmethoden können Aussagen zu Erfolgskriterien von Modellen nur sehr eingeschränkt getroffen werden. In diesem Fall sind Experten als Probanden notwendig, welche die untersuchten Modelle auf Basis ihres impliziten Erfahrungswissens erstellen können. Damit können jedoch keine Aussagen zur Anwendbarkeit eines Modells für seine Zielgruppe getroffen werden, da die Experten implizite Modellbildungsmethoden anwenden, welche in der Zielgruppe meist nicht im gleichen Umfang genutzt werden können. Waren die Experten zusätzlich an der Entwicklung des zu untersuchenden Modells beteiligt, besitzen sie zudem spezifisches Erfahrungswissen zur Bildung des untersuchten Modells. Dieses Wissen steht potentiellen Modellnutzern in der Regel nicht zur Verfügung.

Im Folgenden wird auf Herausforderungen und bestehende Lösungsansätze zur Untersuchung von Modellbildungsmethoden im Rahmen der Methodenvvalidierung eingegangen.

2.7.1 Herausforderungen der Methodenvvalidierung

Dieses Kapitel basiert auf der Publikation (Eisenmann et al. 2021b). Teile des folgenden Texts sind ohne Veränderung aus der Veröffentlichung in deutscher Form übernommen. Der Autor dieser Forschungsarbeit hat an der Recherche von Herausforderungen in der Methodenvvalidierung sowie der Ausarbeitung des Manuskripts mitgearbeitet.

In der Produktentwicklungsforschung ist die Validierung von Methoden ein wichtiger Bestandteil, da nur durch sie Erkenntnisse zu Erfolgskriterien entwickelter Methoden erhoben werden können (Blessing und Chakrabarti 2009). Häufig werden in der Produktentwicklungsforschung Methoden mit hohem Aufwand entwickelt und eine Validierung anschließend eher zur Bestätigung der entwickelten Methode als zum objektiven Erkenntnisgewinn durchgeführt (Albers et al. 2018). Eine ungenügende Validierung wird als ein Grund beschrieben, warum Forscher in der Produktentwicklung Schwächen ihrer Methoden nicht erkennen können (Gericke et al. 2017). Die umfassende Validierung von Methoden zur Produktentwicklung ist eine beinahe unmögliche Aufgabe, da für belastbare Ergebnisse mehrere Unternehmen über einen langen Untersuchungszeitraum beteiligt sein müssten, in dem sich zudem die ökonomischen Randbedingungen nicht ändern dürfen (Vermaas 2016).

Trotzdem ist die Validierung dieser Methoden unerlässlich, da sonst Herausforderungen bezüglich ihrer Erfolgskriterien (beispielsweise Anwendbarkeit) nicht identifiziert und behoben werden können. Treten dann in der Anwendbarkeit Schwierigkeiten auf, kann dies zur Ablehnung der Methode in der Unternehmenspraxis führen (Geis et al. 2008). Treten weitere Akzeptanzbarrieren wie beispielsweise hoher Lernaufwand oder abstrakte Methodenbeschreibung auf, verkompliziert sich die Methodenanwendung weiter und das Risiko von Fehlanwendung und zu geringem „Wirkungsgrad“ (Aufwand zu Nutzen des Methodeinsatzes) steigt (Beckmann et al. 2014; Jänsch 2007).

Es ist zudem ebenfalls möglich, dass eine Methode nicht für die Praxis geeignet ist, was darauf hindeutet, dass die Verbindung von Methodenforschung und Unternehmenspraxis zu schwach ist (Wallace 2011). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Methoden aufgrund von Herausforderungen wie geringer Anwendungseignung oder Erfolgserlebnissen der Anwender selten in der Unternehmenspraxis angewandt werden (Reiß et al. 2017).

2.7.2 Vorgehensmodelle der Produktentwicklungsforschung

Das bekannteste Vorgehensmodell der Produktentwicklungsforschung ist die Design Research Methodology DRM nach Blessing und Chakrabarti (2009). Diese umfassende Methodologie beinhaltet eine übergeordnete Struktur in vier Stufen, die zur Planung und Einordnung von Forschungsaktivitäten genutzt werden kann. Zudem enthält sie Elemente wie das „Reference Model“ und das „Impact Model“, welche Beziehungen zwischen Variablen eines Studiendesigns visualisieren. Im Reference Model wird der aktuelle Stand der Forschung abgebildet, indem den beschriebenen Beziehungen Quellen zugeordnet werden. Das Impact Model beinhaltet zusätzlich noch die entwickelte Unterstützung, durch welche das Reference

Model erweitert wird. Beispiele für diese Modelle finden sich in Blessing und Chakrabarti (2009) sowie in der Beschreibung der zweiten deskriptiven Studie dieser Forschungsarbeit in Kapitel 6. Zusätzlich werden viele Hinweise und Hilfsmittel zur allgemeinen Planung und Durchführung wissenschaftlicher Studien im Design Research gegeben. Eine spezifische Hilfestellung zur Methodvalidierung wird jedoch nicht gegeben.

Weitere Vorgehensmodelle sind die „Spiral of Applied Science“ von Eckert et al. (2003), die fünf Kategorien nach Cantamessa (2003) oder das „Layered Model“ nach Reich (1994). Diese beschreiben auf hoher Abstraktionsebene Möglichkeiten zur Durchführung der Forschung und beinhalten deshalb keine explizit zur Methodvalidierung nutzbaren Elemente. Sie können, wie beispielsweise die „Spiral of Applied Science“, zur Forschungsstrukturierung von Lehrstühlen und Forschungsbereichen genutzt werden, während die DRM auch explizit für einzelne Forschungsarbeiten einsetzbar ist.

Vorgehensmodelle, die auf die Methodvalidierung fokussieren, sind beispielsweise das „Validation Square“ nach Pedersen et al. (2000). Dieses Vorgehensmodell besteht aus vier Dimensionen, die in sechs Schritten durchlaufen werden. Hierbei wird zwischen theoretischer und empirischer Validierung unterschieden. Interne Validität kann durch formale und quantifizierte Untersuchungen erreicht werden, wohingegen der Nutzen einer Methode im realitätsnahen Kontext erfolgen muss, in dem die interne Validität der Untersuchung reduziert ist. (Pedersen et al. 2000)

Marxen beschreibt Lücken im „Validation Square“, beispielsweise, dass es nur die Kombination bereits bestehender Methoden ermöglicht, und somit für die Synthese neuer Ideen ungeeignet ist. Auch die Herausforderung des experimentellen Erkenntnisgewinns wird hier nicht ausreichend adressiert, da keine Hilfestellung zur Variation einzelner Methodenelemente gegeben werden, die notwendig sind, um kausale Zusammenhänge zu ermitteln. (Marxen 2014)

Ein weiteres Vorgehensmodell, dass Validierung in der Methodenforschung adressiert, ist die „Concept Map“ nach Üreten et al. (2019). In diesem Modell wird die experimentelle Validierung von Methoden betrachtet und eine strukturierte Übersicht von forschungsrelevanten Elementen gegeben. Beispielsweise werden Dimensionen von Erfolgskriterien und Unterscheidungen von Variablen beschrieben.

Noch konkretere Vorgehensmodelle beschreiben detaillierte Versuchsplanungen. Sie werden zur Methodvalidierung genutzt, sind jedoch nicht speziell hierfür entwickelt worden. Beispiele sind Methoden des Design of Experiments, in denen Versuchspläne zum experimentellen Erkenntnisgewinn abhängig von Anzahl und Art der verfügbaren Variablen erstellt werden (Siebertz et al. 2017).

Zusammenfassend zeigt sich hier die Herausforderung, dass Vorgehensmodelle der Produktentwicklungsforschung entweder abstrakte und allgemeingültige Hilfestellungen bieten oder im Detail unterstützen und nur eingeschränkt in die Methodvalidierung übertragbar sind. Die DRM beinhaltet Hilfestellungen auf beiden Ebenen, benötigt jedoch aufgrund ihres Umfangs eine erhebliche Einarbeitungszeit, bis sie zielführend in der Methodvalidierung genutzt werden kann. Zudem beinhaltet sie keine spezifischen Hilfestellungen zur Methodvalidierung.

Forschungsbedarf besteht darin, mit den verteilt vorliegenden Hilfestellungen eine konkrete Untersuchung zur Validierung von Modellbildungsmethoden bezogen auf gewählte Erfolgskriterien zu erstellen.

2.7.3 Studiendesigns der Produktentwicklungsforschung

Die Wahl des Studiendesigns entscheidet maßgeblich über den notwendigen Aufwand in der Studiendurchführung und den aus der Studie möglichen Erkenntnisgewinn. Es können verschiedene Arten von Studiendesigns unterschieden werden, die sich nach der Belastbarkeit der aus ihnen gewonnene Erkenntnisse hierarchisch gliedern lassen. Im Forschungsbereich der evidenzbasierten Medizin werden beispielsweise Hierarchiestufen vom einfachen Erfahrungsbericht bis hin zur zusammenfassenden Übersicht randomisierter Studien (Meta-Analyse) unterschieden (Greenhalgh 1997). Weiter kann zwischen experimentellen und nicht-experimentellen Studien unterschieden werden, wobei aus Letzteren keine kausalen Zusammenhänge abgeleitet werden können (Cash et al. 2016). In der Produktentwicklungsforschung sind je nach Entwicklungsstand des Forschungsgegenstands (Modell oder Methode) unterschiedliche Studiendesigns möglich und sinnvoll.

Fallstudie

Zur explorativen Untersuchung von Sachverhalten in ihrer realen Umgebung bietet sich die Fallstudie an. Diese ist geeignet, um ein erstes, subjektives Bild zu generieren, auf dessen Basis dann Hypothesen zu weiterführender Forschung abgeleitet werden können. (Hussy et al. 2013)

Fallstudien beinhalten häufig qualitative Datenerfassungsmethoden wie beispielsweise teilstrukturierte Interviews. Um den Erkenntnisgewinn aus der Durchführung von Fallstudien zu maximieren, existieren Vorgehensweisen, wie diese aufgebaut werden können. Beispielsweise beschreibt Yin Elemente der Fallstudienforschung (2018). In der Entwicklung von Modellen und Modellbildungsmethoden der Gestaltung besitzt die Fallstudie eine zentrale Bedeutung zur initialen Validierung. In der aktuellen Produktentwicklungsforschung wurden keine Modelle oder Modellbil-

dungsmethoden ohne Anwendung in einer Fallstudie identifiziert. Die Art der Fallstudienumgebung variiert dabei stark von fiktiven Anwendungen über akademische Beispiele bis zu Entwicklungsprojekten im Unternehmensumfeld. Auch die eingesetzte Datenerfassung variiert vom Erfahrungsbericht bis hin zur triangulierten Datenerfassung. (Eisenmann et al. 2021b)

Feldstudie

Eine Feldstudie findet in einer realitätsnahen Umgebung statt. Sie kann als anschließende Untersuchung zu einer explorativen Fallstudie Hypothesen mit größeren Probandengruppen verifizieren. Hierbei ist keine Randomisierung möglich, ebenso fehlt eine gezielte Einstellung der unabhängigen Variablen. Die interne Validität ist dadurch gering und eine kausale Interpretation der identifizierten Zusammenhänge ist nur in Ausnahmen möglich. Insbesondere der Einfluss von Störgrößen und die oft lange Projektdauer können dazu führen, dass wesentliche Einflüsse trotz hohem Untersuchungsaufwand nicht erfasst werden können (Blessing und Chakrabarti 2009). Eine Stärke der Feldstudie ist jedoch ihre hohe externe Validität durch geringe Veränderung der Untersuchungsumgebung (Hussy et al. 2013). Feldstudien sind in der Produktentwicklungsforschung gut geeignet, um Herausforderungen und Methoden zu ihrer Überwindung explorativ zu identifizieren und quantifizieren zu können. Beispielsweise können erfolgreiche Strategien von Konstrukteur/-innen ermittelt werden (Eckert et al. 2012).

Eine speziell für die Produktentwicklungsforschung entwickelte Form der Feldstudie ist das sogenannte Live-Lab (Walter et al. 2016). Es ist ein studentisches Entwicklungsprojekt, in welchem meist über den Verlauf eines Semesters eine reale oder aus der Realität abgeleitete Entwicklungsaufgabe bearbeitet wird. Dies findet oft unter Beteiligung von Unternehmen statt und ermöglicht dadurch die Untersuchung realitätsnaher Entwicklungssituationen in einer relativ kontrollierten Umgebung des universitären Umfelds. Durch die Einstellungs- und Kontrollmöglichkeiten im universitären Umfeld können viele Erkenntnisse zu realitätsnahen Fragestellungen gewonnen werden, welche bei Durchführung in Unternehmen nicht untersucht werden können.

Experiment

Der größte Vorteil experimenteller Studien ist die Erfassbarkeit von kausalen Zusammenhängen zwischen Variablen. Dies ist möglich, da Variablen im Experiment kontrolliert variiert (oder konstant gehalten) werden können. Der Umfang, in dem diese Kontrolle möglich ist, bestimmt die Güte der internen Validität, d. h. die Berechtigung einer Annahme von Kausalität. In der Überprüfung von Hypothesen steigt mit einer verbesserten Kontrolle die Präzision der Erkenntnisse, die gewonnen

werden können. Herausforderungen dieses Studiendesigns sind der hohe notwendige Aufwand und die „künstliche“ Umgebung von Laborstudien. (Hussy et al. 2013)

Experimentelle Untersuchungen sind in der Untersuchung von Modellen und Modellbildungsmethoden aufgrund der genannten Herausforderungen in der Umsetzung dieses Forschungsdesigns relativ selten. Die gezielte Abstraktion realer Entwicklungsprozessen ist eine extreme Herausforderung, da sowohl die Umstände (Hilfsmittel, Randbedingungen etc.) als auch das Erfahrungswissen der Mitarbeiter abgebildet und kontrolliert werden müssen. Es ist jedoch möglich, reale Entwicklungssituationen zu isolieren und retrospektiv für eine experimentelle Studie aufzubereiten. Beispielsweise konnte so die Analysis of Competing Hypotheses (ACH) Methode auf ihre Wirksamkeit bezüglich der Verringerung des Bestätigungsfehlers (Confirmation Bias) untersucht werden (Nelius und Matthesen 2019).

Studiendesigns experimenteller Studien können neben der klassischen Anordnung der Kontroll- und Testgruppe auch als sogenanntes Crossover-Design ausgeführt werden (Mills et al. 2009). Dieses Studiendesign ermöglicht belastbare Erkenntnisse mit weniger Probanden als die klassische Anordnung, da hier jeder Proband die Kontroll- und Testgruppe durchläuft. Da jeder Proband als seine eigene Kontrollgruppe genutzt werden kann, reduzieren sich personengebundene Streuungen. Mit einer geeigneten Anordnung können Vergleiche sowohl innerhalb einer Gruppe als auch zwischen Kontroll- und Testgruppe durchgeführt werden, wodurch eine vertiefte Analyse der Untersuchung möglich ist.

Ein Großteil der Untersuchung zu Modellen und Modellbildungsmethoden der Gestaltung kann als Fallstudie betrachtet werden. Hierbei wird das Modell meist von Experten angewandt, um eine Herausforderung im Unternehmensumfeld zu lösen. Der Nutzen des Modells wird über den Projekterfolg bewertet. Diese Untersuchungen sind essentiell, da der Nutzen eines Modells seine Daseinsberechtigung bildet und es gerade bei sehr spezifischen Modellen ausreichend ist, wenn sie von wenigen Experten beherrscht werden, die im Bedarfsfall konsultiert werden können. Für Modelle, deren Ziel die Unterstützung in der Gestaltung ist, genügen diese Studien jedoch nicht. Hier ist eine geringe Hürde in der Anwendbarkeit des Modells in Entwicklungsteams entscheidend dafür, dass es überhaupt in der Gestaltung zu Einsatz kommt. Dies bildet auch die Basis für weiterführende Studien, welche über Experten-Erfahrungsberichte hinausgehen und kausale Zusammenhänge aufdecken sollten.

Forschungsbedarf der Methodvalidierung besteht darin, diese weiterführenden Studien so aufzubauen, dass der gewünschte Erkenntnisgewinn möglich wird. Dadurch, dass in der Methodvalidierung generell wenig experimentelle Studien

existieren, fehlen Referenzen zum Aufbau geeigneter Studien in der Validierung von Modellbildungsmethoden. Dies führt dazu, dass eine Studie nicht nur an sich geplant und durchgeführt werden kann, sondern zunächst die Operationalisierung von Ziel- und Stellgrößen sowie geeignete Datenerfassung und -auswertung entwickelt werden muss.

2.7.4 Validierungsstudien zum C&C²-Ansatz

Der C&C²-Ansatz wurde in verschiedenen Studien hinsichtlich seines Nutzens in verschiedenen Situationen der Produktentwicklung untersucht. Neben vielen Fallstudien (Albers et al. 2008b; Albers et al. 2008c; Albers et al. 2010; Ohmer 2008) wurden auch Feldstudien (Albers et al. 2004b) und Experimente (Gladysz und Albers 2018b) durchgeführt. Eine Übersicht dieser Untersuchungen findet sich in (Grauberger et al. 2020d).

Die Fallstudien zeigen exemplarische Anwendungen des C&C²-Ansatzes und beschreiben den erreichten Projekterfolg als Zielgröße der Untersuchung. Der empirische Nutzen kann damit gezeigt werden, was initial eine hochgradig relevante Erkenntnis ist. Zudem können je nach Aufbau der Fallstudie viele explorative Beobachtungen durchgeführt und Hypothesen zur Weiterentwicklung des C&C²-Ansatzes aufgestellt werden. Kausale Aussagen können aus diesen Fallstudien aufgrund der Vielzahl an unbekanntem Einflussgrößen und der fehlenden Vergleichsgruppe nicht abgeleitet werden.

Die erste Feldstudie zum C&C²-Ansatzes basierte auf der Auswertung von Lösungen von Musteraufgaben im Rahmen der universitären Ausbildung. In diesen Aufgaben musste die Funktionsweise technischer Systeme auf Basis gegebener Zeichnungen identifiziert werden. Das Systemverständnis wurde hier über das Verstehen der Funktionsweise des technischen Systems und das Erkennen von WFP gemessen. Hier zeigte sich eine Korrelation zwischen Systemverständnis und Vermittlung des Elementmodells² in der Vorlesung Maschinenkonstruktionslehre. (Albers et al. 2004b). Dieser Feldstudie liegt ein deutlich umfangreicherer Datensatz zugrunde als den oben erwähnten Fallstudien, was die Belastbarkeit der Aussagen erhöht. Jedoch können noch keine kausalen Zusammenhänge abgeleitet werden, da die Untersuchungsumgebung nicht konstant gehalten werden konnte und viele potentielle Einflussgrößen in die Studie hineinspielten.

² Eine Entwicklungsstufe des C&C²-Ansatzes, siehe auch Grauberger et al. (2020d).

Experimentelle Studien zum C&C²-Ansatz liegen ebenfalls vor. Hier zeigten sich erhebliche Herausforderungen im Aufbau des Studiendesigns und der darin eingesetzten Untersuchungsmethoden. Diese Studien werden im Folgenden detaillierter beschrieben, da sie für die zweite deskriptive Studie dieser Forschungsarbeit relevant sind.

In einer experimentellen Studie von Eckert et al. (2012) wurde ausgehend von Fragestellungen des C&C²-Ansatzes ein Experiment zum Einfluss des vorgegebenen Systemabbilds (Zeichnung / 3D Modell) auf die Funktionsanalyse durchgeführt. Hierbei zeigte sich – neben vielen weiteren Korrelationen – der Kausalzusammenhang zwischen dem gegebenen Systemabbild und der Anzahl erstellter Skizzen durch die Probanden. Dieser Zusammenhang ist als Basis für Studien zum C&C²-Ansatz hochrelevant, da der Aufbau von C&C²-Modellen erheblich von der Wahl des Systemabbilds abhängt. Hier zeigt sich auch, wie hoch der Aufwand zur Erzeugung einzelner kausaler Erkenntnisse zum C&C²-Ansatz ist, da dieser Zusammenhang nur einen Teilaspekt im C&C²-Ansatz beschreibt. Zudem ist aus diesem Experiment keine Aussage zu Erfolgskriterien der Gestaltung möglich, da nicht klar ist, ob die Art zu skizzieren einen Einfluss auf den Erfolg in der Gestaltung hat.

Viele weitere Beobachtungen dieser Studie wurden als Feldstudie ausgewertet. Beispielsweise wurden Schwierigkeiten in der Formulierung von Funktionen durch die Probanden beobachtet. Dies ist für die Untersuchung der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz ebenfalls relevant, da zur Explizierung des Modellzwecks in der Regel Funktionen formuliert werden müssen, deren Zusammenhang mit der Gestalt das Ziel der Modellbildung darstellt. Ein kausaler Zusammenhang lässt sich jedoch nicht ableiten, da die Funktionsformulierung nicht gezielt variiert wurde.

In der experimentellen Untersuchung einer Unterstützung der FMEA durch den C&C²-Ansatz wurden kausale Zusammenhänge zwischen der Nutzung des C&C²-Ansatzes und einem Erfolgskriterium der FMEA aufgedeckt (Gladysz und Albers 2018b). In dieser Studie wurden C&C²-Modelle vorgegeben, um ihren Einfluss auf die FMEA verglichen zu anderen vorgegebenen Modellen zu untersuchen. Dadurch konnten Aussagen zum Nutzen des Modells in einem speziellen Anwendungsfall getroffen werden. Eine der wichtigsten Aussagen dieser Untersuchung ist der kausale Zusammenhang zwischen der Modellbildung durch Connectoren und der Identifikation von Fehlerursachen in der Systemumgebung.

In der Studie von Albers und Gladysz wurde mit bereits erstellten C&C²-Modellen gearbeitet. Hierdurch werden die Einflussgrößen im Experiment reduziert und können besser kontrolliert werden. Jedoch können keine Einflussgrößen der Modellbildung untersucht werden. Die Anzahl identifizierter Fehler lässt zudem keine direkten

Rückschlüsse auf erkannte GFZ zu, da viele der erkannten Fehler nicht im Bereich des Gestaltungsraums lagen und somit nicht auf einen funktionsrelevanten Gestaltungsparameter zurückgeführt werden können. Hier zeigt sich deutlich, wie stark Untersuchungen eingeschränkt werden müssen, um kausale Zusammenhänge erfassen zu können und wie selbst hier eine Unsicherheit bezüglich der untersuchten Variablen bleibt.

Zur Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz wurde abseits der Fallstudien mit Experten keine Untersuchung identifiziert. Es liegen deshalb keine Erkenntnisse zur Anwendbarkeit der Modellbildungsmethoden für Analyse und Synthese vor. Die expliziten Modellbildungsmethoden wurden erst 2018 vorgestellt und sind damit relativ neu (Matthiesen et al. 2018a). Ein Vorläufer dieser Methoden wurde generisch und in Verbindung mit weiteren Methoden und Modellen beschrieben (Albers und Wintergerst 2014). Vor diesem Vorgehen existierten diverse Heuristiken, um Teilaspekte von C&C²-Modellen aufzubauen (Thau 2013). Davor wurden Meta-Regeln abgeleitet, welche Handlungsempfehlungen zum Konstruieren mit dem C&C²-Ansatz beinhalten, jedoch nicht explizit den Aufbau von C&C²-Modellen unterstützen (Ohmer 2008). Als initiale Modellbildungsmethoden können die drei Grundhypothesen als Regeln zum Modellaufbau betrachtet werden (Matthiesen 2002). Ziel dieser Hypothesen war jedoch die Formalisierung der Nutzung der Elemente und weniger die Unterstützung im Aufbau von C&C²-Modellen. Auch zu diesen Vorläufern existieren keine über Fallstudien mit Modellanwendung durch einzelne Experten hinausgehenden Untersuchungen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass bereits viele Untersuchungen zum C&C²-Ansatz durchgeführt wurden. Ein Großteil dieser Untersuchungen fand als Fallstudie mit Anwendung durch Experten statt. Feldstudien und Experimente existieren zur Modellnutzung im C&C²-Ansatz. In diesen Studien zeigt sich die Operationalisierung der Vielzahl an Einflussgrößen als Herausforderung. Es sind keine Untersuchungen bekannt, in denen die Modellbildung im Fokus stand.

Forschungsbedarf liegt hier darin, dass belastbare Erkenntnisse zur Modellbildung notwendig sind, um den C&C²-Ansatz zielführend weiterzuentwickeln.

2.8 Zusammenfassung des Stands der Forschung

In der Gestaltung spielt das Verständnis des GFZ eine zentrale Rolle. Um Aspekte des GFZ abzubilden, wird eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle genutzt. Hierbei

treten verschiedene Herausforderungen auf, da Modelle nur begrenzte Abbildungsmöglichkeiten besitzen, Lücken und Fehler beinhalten und dazu verleiten können, sie zweckentfremdet anzuwenden.

Um ein Produkt in seinen Details definieren zu können, müssen quantitative Parameter angegeben werden (beispielsweise ein Längenmaß mit zulässigem Toleranzfeld). Dazu müssen quantitative GFZ verstanden werden. Hierzu werden rechnerunterstützte Modelle genutzt, welche aus Expertenwissen (qualitativem Verständnis im mentalen Modell ihrer Ersteller) aufgebaut werden. Um dieses Wissen zu explizieren und die oben beschriebenen Herausforderungen zu adressieren, müssen qualitative Modelle genutzt werden.

Qualitative Modelle existieren zu unterschiedlichen Modellzwecken der Produktentwicklung und beinhalten entsprechende Abbildungsmöglichkeiten. Für den Zweck des Erkenntnisgewinns werden visuell unterstützte Modelle genutzt. Eins dieser Modelle ist das C&C²-Modell, das mithilfe des C&C²-Ansatzes gebildet wird und die Basis dieser Forschungsarbeit bildet. Es bildet qualitative GFZ in statischen und auch quasistatischen Systemzuständen visuell ab.

Um Modelle in Forschung und Praxis nutzen zu können, sind Modellbildungsmethoden notwendig. Für quantitative Modelle existieren viele Modellbildungsmethoden auf unterschiedlicher Abstraktionsebene. Qualitative Modelle sind häufig nur wenigen Experten zugänglich, welche implizite Modellbildungsmethoden (Erfahrungswissen) nutzen können.

Um qualitative Modelle zielführend entwickeln zu können, sind Erkenntnisse zu den Erfolgskriterien Anwendbarkeit und Nutzen, später auch zur Akzeptanz notwendig. Diese Erkenntnisse können durch geeignete Studien gewonnen werden. In der Produktentwicklungsforschung gibt es bislang jedoch wenig Hilfestellungen zu Studiendesign oder Datenerfassung. Dies erschwert die Erzeugung von belastbaren Erkenntnissen und führt dazu, dass Modelle und Modellbildungsmethoden kaum in Studien höherer Evidenzstufen untersucht werden.

Im Umfeld des C&C²-Ansatzes ist die Durchführung experimenteller Studien aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren und fehlender Referenz-Studiendesigns schwierig. Der Nutzen von C&C²-Modellen wurde bereits am Beispiel einer FMEA experimentell untersucht, jedoch wurden hier bereits im Vorfeld von Experten gebildete Modelle genutzt (Gladysz und Albers 2018b). Dadurch sind keine Aussagen zur Anwendbarkeit der Modellbildung ableitbar. Die fehlenden Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz verhindern experimentelle Studien mit Novizen im Umgang mit dem C&C²-Ansatz. So können keine Aussagen zum Nutzen der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz getroffen werden.

3 Motivation und Zielsetzung

In diesem Kapitel wird zunächst die Motivation dieser Forschungsarbeit auf Basis des Stands der Forschung beschrieben. Anschließend wird das Ziel dieser Forschungsarbeit und die daraus abgeleiteten Forschungsfragen beschrieben. Abschließend wird die Vorgehensweise dargestellt, mit der die Forschungsfragen beantwortet werden sollen. Sie besteht übergeordnet aus der Analyse des C&C²-Ansatzes, der Entwicklung des EnhanCE Modelling und der Validierungsstudie, in welcher die durch EnhanCE Modelling vermittelte Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz bezüglich ihres Nutzens in der Gestaltung untersucht wird. Diese Forschungsarbeit beinhaltet damit zwei deskriptive Studiencharakteristiken (Analyse und Validierungsstudie) sowie eine präskriptive Studiencharakteristik in der Entwicklung des EnhanCE Modelling.

3.1 Motivation

Die Motivation dieser Forschungsarbeit wird wie folgt aus dem erhobenen Forschungsbedarf zur qualitativen Modellbildung von GFZ in der Gestaltung abgeleitet.

In Zukunft werden Gestaltungsaktivitäten durch Frontloading und agile Ansätze immer früher im Produktentwicklungsprozess notwendig sein. Dadurch gewinnt die Anwendung qualitativer Modelle, welche bereits auf Basis weniger Informationen gebildet werden können, an Bedeutung. Aktuell wird das Potential dieser Modelle zum Erkenntnisgewinn und auch zur Dokumentation und Diskussion von Wissen zu GFZ in Entwicklungsteams noch wenig genutzt. Ein Großteil dieses Wissens existiert nur implizit als Erfahrungswissen, da kein geeignetes Modell vorhanden oder bekannt ist.

Um qualitative Modelle nutzen zu können, müssen sie zunächst gebildet werden. Fehler in der Modellbildung können Fehlschläge in Entwicklungsprojekten hervorrufen und dazu führen, dass qualitative Modelle nicht verwendet werden. Hieraus zeigt sich eine Schlüsselrolle von Modellbildungsmethoden für die Nutzbarkeit qualitativer Modelle in der Praxis. Forschungsbedarf besteht hier darin, dass für qualitative Modelle kaum Modellbildungsmethoden vorliegen, wodurch ihre Anwendbarkeit in der Gestaltung erschwert wird.

Aktuell ist unklar, wie diese Modellbildungsmethoden entwickelt und validiert werden können und in welcher Form sie einen Mehrwert für die Modellnutzung bieten. Im Bereich der Methodvalidierung bestehen bereits Möglichkeiten, diesen Mehrwert zu erfassen. Speziell zur Untersuchung qualitativer Modellbildungsmethoden wurden jedoch keine experimentellen Studien identifiziert, wodurch belastbare Aussagen fehlen. Forschungsbedarf in der Methodvalidierung besteht deshalb darin, die verteilt vorliegenden Hilfestellungen zur Erstellung konkreter experimenteller Untersuchungen zur Validierung von Modellbildungsmethoden zu nutzen. Hierzu muss zunächst eine Untersuchungsumgebung erstellt werden. Beispielsweise müssen geeignete Ziel- und Stellgrößen definiert, Aufgaben gestellt und überprüft sowie geeignete Datenerfassung und -auswertung entwickelt werden.

Zur Nutzung des C&C²-Ansatzes und der mit ihm gebildeten C&C²-Modelle besteht Forschungsbedarf darin, dass größtenteils unklar ist, wie und wo sie seit ihrer Entwicklung in der Gestaltung eingesetzt werden. Zudem wird er meist nur von Experten im Umgang mit dem C&C²-Ansatz genutzt, wodurch wenig Einblicke in die Modellbildung vorliegen. In der Modellbildung von GFZ mit dem C&C²-Ansatz führt dies dazu, dass unbekannt ist, ob er ohne Vorkenntnisse überhaupt anwendbar und damit in der Gestaltung nutzbar ist.

3.2 Zielsetzung und Forschungsdesign

Übergeordnete Zielsetzung dieser Forschungsarbeit ist die methodischen Unterstützung der Modellbildung von GFZ in der Gestaltung auf Basis des C&C²-Ansatzes. Um dieses Ziel zu erreichen, wird das EnhanCE Modelling als Methodenschulung für die Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz entwickelt. Hierzu werden drei Forschungsfragen formuliert, die in den folgenden Kapiteln beantwortet werden.

Ausgangsbasis der Forschungsfrage 1 ist, dass aus dem Stand der Forschung unklar ist, wie mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung Modelle von GFZ gebildet werden. Weiter ist unklar, welche Herausforderungen dabei bestehen und wie diese die Erfolgsfaktoren Anwendbarkeit und Nutzen beeinflussen:

Forschungsfrage 1: Wie wird die Modellbildung von GFZ aktuell mit dem C&C²-Ansatz durchgeführt und welche Herausforderungen bestehen dabei?

In der in Kapitel 4 beschriebenen Analyse werden zwei Fallstudien, eine Literaturstudie sowie eine Projektanalyse durchgeführt, um die Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz zu erforschen. In den Fallstudien wird die Anwendung des C&C²-Ansatzes in einem Entwicklungsprojekt untersucht (Matthiesen et al. 2017b; Matthiesen et al. 2018b). Die erste Literaturstudie untersucht, wie der C&C²-Ansatz in publizierten Forschungs- und Entwicklungsprojekten angewandt wird (Grauberger et al. 2020d). Basierend auf dieser Studie wird eine retrospektive Projektanalyse durchgeführt, um Informationen zu Elementen und Methoden im C&C²-Ansatz zu gewinnen (Grauberger et al. 2020a). Dieser Teil der Analyse dient dazu, Erkenntnisse zu Nutzen und Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes zu gewinnen. Die unzureichende Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes wird als zentrale Herausforderung identifiziert. Weitere Herausforderungen betreffen die Anschlussfähigkeit, den Erkenntnisgewinn und die Modellbildung von komplizierten Systemen mit dem C&C²-Ansatz.

Anschließend wird die zentrale Herausforderung durch Forschungsfrage 2 adressiert:

Forschungsfrage 2: Wie kann die Modellbildung von GFZ auf Basis des C&C²-A methodisch unterstützt werden, um die zentrale Herausforderung der Anwendbarkeit zu überwinden?

In der Beantwortung dieser Forschungsfrage wird das EnhanCE Modelling als Schulungsmethode zur Vermittlung und Erforschung der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz abgeleitet. Es besteht aus drei kontextspezifisch einsetzbaren Schulungen zur Vermittlung des C&C²-Ansatzes (Grauberger et al. 2021). Zudem wird eine Untersuchung der Anwendbarkeit durchgeführt, in der Anwendungshürden identifiziert und behoben werden (Eisenmann et al. 2021a). Dadurch ermöglicht das EnhanCE Modelling die Modellbildung von GFZ auch für Laien im Umgang mit dem C&C²-Ansatz.

Auf Basis des EnhanCE Modelling kann der Nutzen des C&C²-Ansatzes durch Beantwortung der Forschungsfrage 3 untersucht werden:

Forschungsfrage 3: Welchen Einfluss hat die entwickelte methodische Unterstützung auf den Nutzen des C&C²-Ansatzes in der Modellbildung von GFZ?

Diese Forschungsfrage wird durch eine experimentellen Studie beantwortet, in der die Grundlagenschulung als Variante des EnhanCE Modelling zur Modellbildung mit

dem C&C²-Ansatz genutzt wird (Grauberger et al. 2022). Hierdurch werden belastbare Aussagen zum Nutzen der im EnhanCE Modelling vermittelten Modellbildung mit dem C&C²-Ansatzes möglich. Zudem wird weiteres Forschungspotential zur Methodvalidierung von Modellbildungsmethoden zu GFZ aufgedeckt.

4 Analyse der Modellbildung von GFZ mit dem C&C²-Ansatz

In diesem Kapitel werden Studien in der Analyse dieser Forschungsarbeit beschrieben. Die Übersicht der durchgeführten Studien zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 ist in Abbildung 4-1 zusammengefasst:

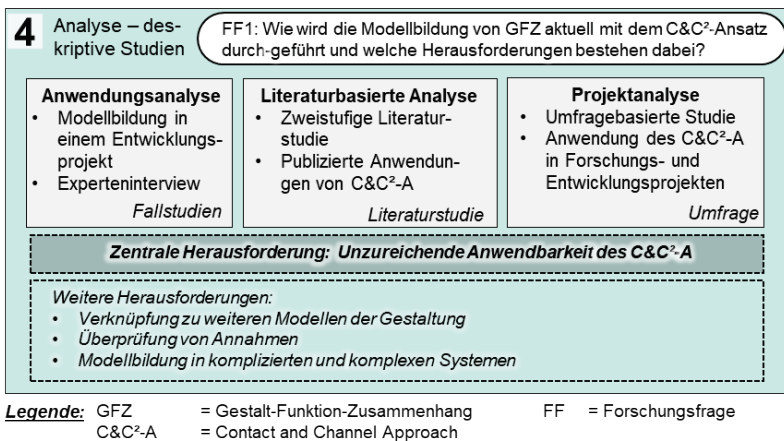


Abbildung 4-1: Übersicht der Analyse-Aktivität der Forschungsarbeit

In diesem Kapitel wird die aktuelle Anwendung der Modellbildung von GFZ mit dem C&C²-Ansatz und dabei auftretende Herausforderungen in Fallstudien und Projektanalysen untersucht.

Dazu werden zunächst zwei Anwendungen des C&C²-Ansatzes analysiert. Darauf aufbauend werden zwei Projektanalysen beschrieben, die den C&C²-Ansatz literatur- und umfragenbasiert betrachten. Hieraus ergeben sich vier Herausforderungen, welche in der Entwicklung der methodischen Unterstützung berücksichtigt werden. Die zentrale Herausforderung der unklaren Wirksamkeit der Modellbildung bildet die Basis der folgenden Kapitel 5 und 6. Zu den drei weiteren Herausforderungen wurden bereits initiale Studien durchgeführt. Diese sind jedoch nicht Teil dieser Forschungsarbeit. Es wird auf die entsprechenden Publikationen verwiesen.

4.1 Anwendung des C&C²-Ansatz in zwei Fallstudien

In den im Folgenden beschriebenen zwei Fallstudien wurde der C&C²-Ansatz genutzt, um die mathematische Modellbildung technischer Systeme zu unterstützen. Diese Fallstudien dienen der Analyse des bislang bestehenden Forschungsstands des C&C²-Ansatz.

Dieses Kapitel basiert auf den Publikationen (Matthiesen et al. 2017b) und (Matthiesen et al. 2018b). Teile des folgenden Texts sind ohne Veränderung aus der Veröffentlichung in deutscher Form übernommen. Der Autor dieser Forschungsarbeit war in der Publikation (Matthiesen et al. 2017b) an der Modellbildung und Ausarbeitung beteiligt. In der Publikation (Matthiesen et al. 2018b) war er an der Konzeptionierung, Durchführung und Auswertung der Fallstudie beteiligt.

Zentrale Erkenntnisse:

- Eine qualitative Modellbildung durch Experten im Umgang mit dem C&C²-Ansatz unterstützt beim Verständnis von GFZ im Entwicklungsteam.
- Die Überführung von Annahmen in Erkenntnisse ist eine Herausforderung im C&C²-Ansatz, die methodisch nicht unterstützt wird.

4.1.1 Studiendesign

In einem Forschungsprojekt (BMW i Förderkennzeichen 20Y1509B) wurde eine Validierungsmethode auf Basis gering belastbarer physischer Prototypen entwickelt. Als System zur Entwicklung dieser Methode wurde ein 18V Akkuschauber für Profianwendungen genutzt. Hier war die Entwicklungsaufgabe, das Auslöseverhalten der drehmomentbegrenzenden Kupplung durch eine geänderte Gestalt der Kuppelungsteile verbessert werden. Dabei liegen Varianten der Kupplung als gering belastbare Prototypen vor, welche auf einem speziellen Entwicklungsprüfstand als skalierte Teilsysteme auf ihre Interaktion mit dem Gesamtsystem untersucht werden sollen. In der Entwicklung der Validierungsmethode wurde im ersten Schritt eine qualitative Systemanalyse durchgeführt, um Zustände und in ihnen auftretende GFZ zu identifizieren. Dabei wurde der Projektbearbeiter durch den Autor der Forschungsarbeit methodisch unterstützt. Für die Systemanalyse wurde ein C&C²-Sequenzmodell erstellt. Zum Vorgehen in der beschriebenen Modellbildung wurde im

weiteren Verlauf des Entwicklungsprojekts eine weitere Fallstudie durchgeführt, deren Fokus in der Erfassung von Stärken und Schwächen des C&C²-Ansatzes in der Anwendung lag. Die Datenerhebung wurde durch ein teilstrukturiertes Interview mit dem Projektbearbeiter durchgeführt und unter Beteiligung des Autors der Forschungsarbeit ausgewertet.

4.1.2 Ergebnisse

Das erstellte C&C²-Sequenzmodell ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Es werden vier Zustände modelliert, welche als relevant angenommen werden. Diese Zustände werden über die Höhe und Änderung des übertragenen Drehmoments der Kupplung unterteilt (oben). Darunter sind die jeweils zugehörigen C&C²-Modelle sequenziell angeordnet. Hier ist erkennbar, wie sich WFP über Zustände qualitativ ändern, hinzukommen (Zustand 2) oder wieder auflösen (Zustand 3).

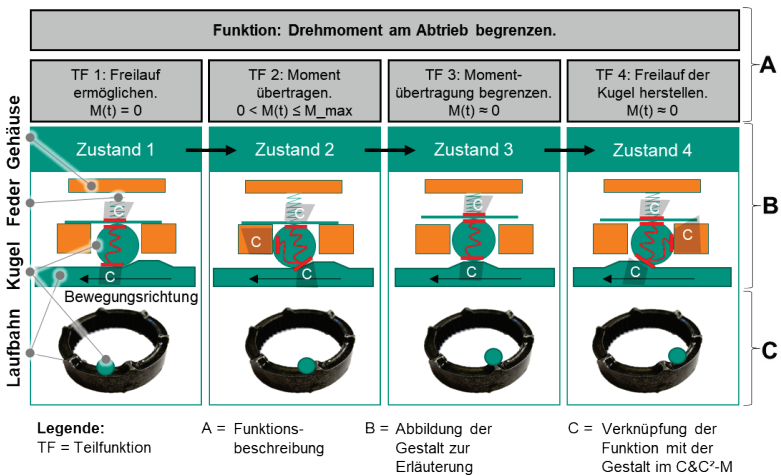


Abbildung 4-2: C&C²-Sequenzmodell als Basis für mathematische Modellbildung (Matthiesen et al. 2017b)

Dieses zunächst qualitative Modell wird durch Versuche verifiziert und durch Erfassung quantitativer Größen wie Zustandsdauer und Höhe des Moments der Kupplung erweitert. Auf Basis dieses um quantitative Größen erweiterten C&C²-Sequenzmodells wurde dann ein mathematisches Modell abgeleitet, das zur

Parametrisierung eines Mehrkörpersimulationsmodells genutzt wurde. (Matthiesen et al. 2017b)

Im weiteren Verlauf des Entwicklungsprojekts wurde das C&C²-Sequenzmodell ausdetailliert und als Basis für ein Mehrkörpersimulationsmodell genutzt. Abbildung 4-3 zeigt eines der gebildeten C&C²-Modelle mit einem Auszug relevanter Parameter in den Kernelementen.

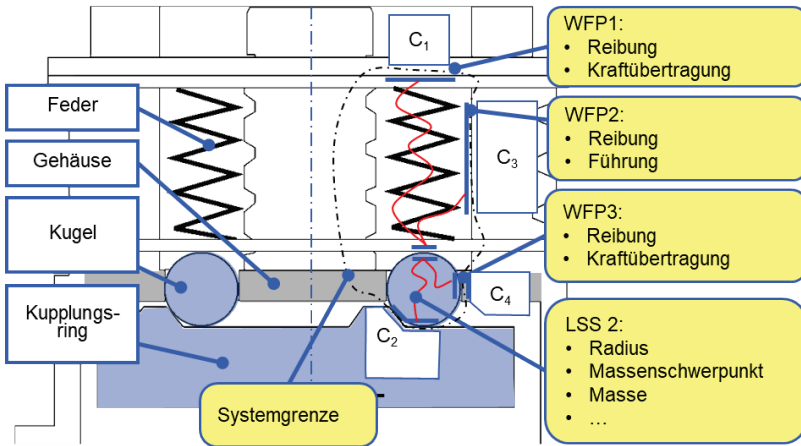


Abbildung 4-3: Detail eines C&C²-Modells mit Parametern nach (Matthiesen et al. 2018b)

Aus dem teilstrukturierten Interview mit dem Projektbearbeiter wurde die Unterstützung bei der zielführenden Vereinfachung des realen Systems durch das Verfolgen des Kraftflusses und die Betrachtung der daran beteiligten Wirkflächenpaare als eine Stärke des C&C²-Ansatz genannt. Auch die funktionsorientierte Unterteilung in Zustände wurde als hilfreich bewertet. Die unterteilten Zustände konnten anschließend als Fallunterscheidungen im Mehrkörpersimulationsmodell integriert werden. Die explizite Systemvisualisierung wurde als hilfreiche Diskussionsgrundlage für Besprechungen im Entwicklungsteam gesehen. (Matthiesen et al. 2018b)

4.1.3 Diskussion

Die Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz durch Modellbildungsexperten des IPEK führte zu einer erfolgreichen Systemanalyse, die zum Aufbau des Mehrkörpersimu-

lationsmodells genutzt werden konnte. Eine in dieser Fallstudie identifizierte Herausforderung liegt in der Darstellung von Parametern in den Kernelementen des C&C²-Ansatzes. Zur Darstellung von Parametern in den Kernelementen des C&C²-Ansatzes existiert keine einheitliche Nomenklatur. Zudem verleitet die Integration vieler Parameter zur Trennung von Visualisierung und textueller Parameterbeschreibung.

Im detaillierten Modell ist erkennbar, dass die Beschreibung der Parameter die Größe des Modells deutlich erhöht. Dies bedeutet, dass C&C²-Sequenzmodelle mit zunehmender Anzahl an betrachteten Zuständen schnell auf eine nicht mehr handhabbare Größe anwachsen können.

Die Überprüfung der in diesem Modell enthaltenen Vermutungen war ebenfalls eine Herausforderung, da sie erst mithilfe des quantifizierten Simulationsmodells möglich wurde. Im Aufbau und der Nutzung der C&C²-Modelle war nicht immer klar, wie detailliert das Modell sein muss und wie entschieden werden kann, ob eine Annahme korrekt war.

4.2 Literaturbasierte Analyse zum C&C²-Ansatz

Dieses Kapitel basiert auf der Publikation (Grauberger et al. 2020d). Teile des folgenden Texts sind ohne Veränderung aus der Veröffentlichung in deutscher Form übernommen.

Zentrale Erkenntnisse:

- Kaum vorhandene Anwendungen des C&C²-Ansatzes ohne Unterstützung der Modellentwickler.
- Publiziert werden meist nur Ausschnitte der Modelle auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen. Die Handhabung der umfangreichen Modelle in den Anwendungsfällen bleibt unklar.

4.2.1 Studiendesign

Um die Daten für diese Untersuchung zu generieren, wurde eine zweistufige data-mining-unterstützte Literaturstudie durchgeführt, in der spezifische Begriffe des

C&C²-Ansatzes gesucht wurden, um publizierte Anwendungsfälle zu identifizieren. Die Recherche wurde Anfang 2018 durchgeführt und Mitte 2019 aktualisiert. Folgende charakterisierende Begriffe des C&C²-Ansatzes wurden in Deutsch und Englisch verwendet: „Working Surface Pair“ / „Wirkflächenpaar“, „Channel and Support Structure“ / „Leitstützstruktur“ und „Connector“ (identisch in Deutsch und Englisch). Etwa 14500 Publikationen aus Journals, Konferenzen und wissenschaftlichen Magazinen aus den Bereichen Produktentwicklung und Design wurden gesammelt und mit einem textbasierten Data-Mining-Algorithmus gesichtet.

Aus diesem Screening wurden 220 Beiträge identifiziert, die durch die Autoren als für die Untersuchung relevant erachtet wurden. In der Aktualisierung wurden weitere 157 Beiträge identifiziert. Diese Beiträge wurden im nächsten Schritt daraufhin überprüft, ob der C&C²-Ansatz nur erwähnt oder im Ergebnis-Kapitel verwendet wurde. Aus den 377 Beiträgen wurden 39 Anwendungsfälle des C&C²-Ansatzes identifiziert. In den anderen Beiträgen wurde der Ansatz im Stand der Forschung erwähnt. Die gefundenen Publikationen wurden ausgewertet und kategorisiert. Die Kategorisierung wurde dabei anhand der Modellzwecke nach Andreasen et al. (2015) durchgeführt (vgl. auch Kapitel 2.3). Zudem wurde erfasst, welche Institute an der Publikation beteiligt waren und aus welcher Entwicklungsphase des C&C²-Ansatzes die Publikation stammt. Entwicklungsphasen wurden in die Phase des voll entwickelten Ansatzes, die Entwicklungsphase und die Phase theoretischer Forschung unterschieden.

Die theoretische Forschung erstreckte sich von 1998 bis 2002. Hier erschienen erste Publikationen zu Ideen der Kernelemente, allerdings wurde noch kein übergreifender Ansatz beschrieben. In der Zeit von 2002 bis 2010 wurden Forschungsprojekte mit dem Elementmodell durchgeführt. In dieser Zeit fanden viele Adaptionen statt, die mit der Integration des Connectors als Kernelement abgeschlossen wurden. Ab 2010 beginnt die Phase des voll entwickelten C&C²-Ansatz. Auch in dieser Phase findet eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Adaption statt, jedoch werden seine Kernelemente und Grundhypothesen nicht mehr angepasst. Als Bewertungsgrundlage wurden Steckbriefe der jeweiligen Projekte erstellt, anhand derer die Einordnung in die Modellzwecke durch die Autoren der Studie vorgenommen wurde.

4.2.2 Ergebnisse

Die Einordnung der identifizierten Publikationen ist in Abbildung 4-4 im Überblick dargestellt. Hier ist als vertikale Achse das Jahr der Publikation mit farblicher Unter-

teilung der drei Phasen des C&C²-Ansatzes abgebildet. Horizontal sind die Kategorien der Modellzwecke dargestellt. Über die Kennzeichnung der Publikationen wird die Nutzungsform und die Autoren der Publikation unterschieden.

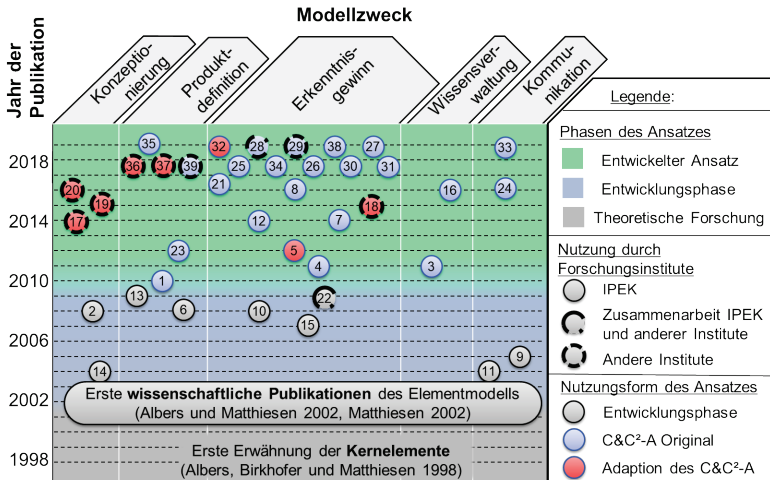


Abbildung 4-4: Übersicht der identifizierten Publikationen zu Anwendungen des C&C²-Ansatzes (Grauberger et al. 2020d)

Die detaillierte Auflistung der hier nummeriert dargestellten Publikationen findet sich in Tabelle 8-2 im Anhang dieser Forschungsarbeit.

Im Folgenden wird ein Beispielprojekt aus dieser Publikation beschrieben, um zu verdeutlichen, wie die Kategorisierung vorgenommen wurde und welche Erkenntnisse daraus abgeleitet wurden.

Beispielprojekt der Kategorie Erkenntnisgewinn¹: *Entwicklung eines Sicherheitsmechanismus* (Anwendung 5 in Abbildung 4-4).

¹ Erkenntnisgewinn bedeutet hier die Generierung von Wissen zu GFZ aus Vermutungen oder auch Wissenslücken. Dies kann durch physische Versuche, virtuelle Simulationen oder auch durch logische Schlussfolgerungen geschehen.

Das Ziel eines Entwicklungsprojekts eines pulvergetriebenen Power-Tools war es, seine Robustheit zu erhöhen. Da beim Einsatz dieses Power-Tools sehr hohe Energiemengen freigesetzt werden (600J, ein Bohrhämmer erzeugt zum Vergleich etwa 5-10J), sind die Sicherheitsanforderungen an ein solches System sehr hoch. Für die Konstrukteure bedeutete dies, dass möglichst alle potenziellen Funktions- und Fehlerfälle bei der Konstruktion berücksichtigt werden sollten.

Zunächst wurde die Analyse mithilfe der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) (Stamatis 2003) durchgeführt, die am Entwicklungsstandort des Unternehmens gesetzlich vorgeschrieben ist. Aufgrund des hohen Grades der funktionalen Integration der Komponenten im System war es schwierig, die für die Sicherheitssysteme relevante Gestalt zu identifizieren und in der FMEA abzubilden. Zur Unterstützung der Analyse wurde der C&C²-Ansatz verwendet. Eine Übersicht über die im Power-Tool implementierten Funktionen ist in dargestellt.

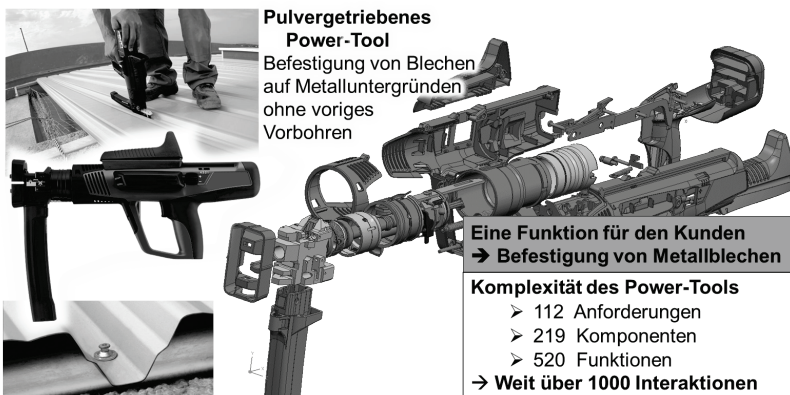


Abbildung 4-5: Übersicht des pulvergetriebenen Power-Tools nach Matthiesen und Ruckpaul (2012)

Dabei zeigte sich, dass das resultierende FMEA-Modell aufgrund der hohen Funktionsintegration für die Produktentwickler nicht mehr handhabbar war. Das C&C²-Sequenzmodell, das bisher auf sequentielle Sequenzen beschränkt war, wurde erweitert, um logisch veränderte Zustände darstellen zu können. (Matthiesen und Ruckpaul 2012)

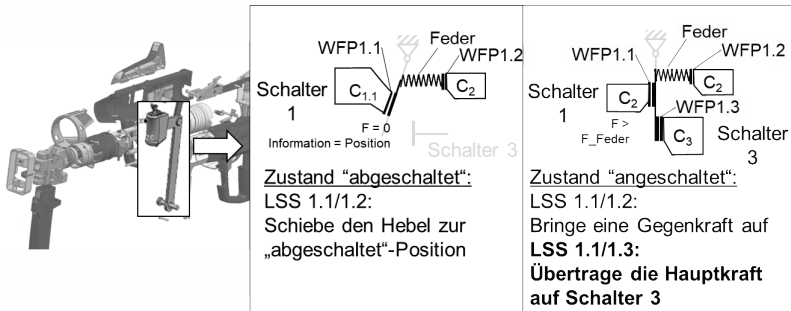


Abbildung 4-6: Analyse logischer Zustände des pulvergetriebenen Power-Tools mit dem C&C²-Ansatz nach Matthiesen und Ruckpaul (2012)

Mithilfe des erweiterten C&C²-Sequenzmodells konnte das System in logische Zustände unterteilt werden, wobei der Schwerpunkt auf der für die Funktionen relevanten Gestalt liegt. Ein Beispiel für zwei logische Zustände ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Dies unterstützte den FMEA-Ansatz und ermöglichte Zuverlässigkeitstests. Durch die Erweiterung des C&C²-Sequenzmodells war es erstmals möglich, Systeme zu beschreiben, die bei der Erfüllung ihrer Funktion keine rein sequentielle Abfolge ihrer Zustände aufweisen. Diese Anwendung des C&C²-Ansatzes unterstützte die FMEA, indem sie auf die kritischen Funktionen fokussierte und eine Struktur der Verkörperungsfunktionsbeziehungen ermöglichte. Dies ermöglichte es den Konstrukteuren, die FMEA auf der Grundlage eines Modells durchzuführen, das die in der FMEA beschriebenen Beziehungen visuell erklärt. Auf diese Weise wurde die FMEA überschaubar und die gesetzlichen Anforderungen konnten von den Konstrukteuren erfüllt werden. (Matthiesen und Ruckpaul 2012)

4.2.3 Diskussion

Die identifizierten Anwendungen zeigen, dass der C&C²-Ansatz in allen Kategorien von Modellzwecken nach Andreasen et al. (2015) eingesetzt wird. In seinen Anwendungen ist eine Fokussierung auf den Modellzweck "Erkenntnisgewinn" zu erkennen, da 20 von 39 Anwendungen dort eingeordnet sind. Die Zwecke "Produktdefinition" (acht Anwendungen) und "Konzeptionierung" (fünf Anwendungen) sind weniger häufig, und bei den Zwecken "Kommunikation" (vier Anwendungen) und "Wissensverwaltung" (zwei Anwendungen) finden sich die wenigsten Anwendungen. Für alle Modellzwecke mit Ausnahme von "Wissensverwaltung" und "Konzeptionierung" wurden Publikationen der letzten zwei Jahre identifiziert, was bedeutet, dass in diesen Bereichen aktuelle Forschung betrieben wird. Der Modellzweck

"Kommunikation" zeigt nur sehr wenige Anwendungen, es kann jedoch gesagt werden, dass alle Anwendungen Aspekte der Kommunikation beinhalten.

Die Anwendungen werden meist im industriellen Umfeld oder unter Beteiligung von Industriepartnern durchgeführt. Dies deutet darauf hin, dass der Einsatz des C&C²-Ansatzes bei Problemen von industriellen Entwicklungsprojekten als vielversprechend angesehen wird, da Unternehmen sonst nicht bereit wären, Ressourcen zu investieren. Auf der anderen Seite werden nur wenige Anwendungen in Forschungsprojekten ohne unternehmensspezifische Probleme identifiziert. Dies deutet darauf hin, dass der C&C²-Ansatz vor allem dann eingesetzt wird, wenn größere Gestaltungsprobleme auftreten und eine gewisse Hemmschwelle in der seiner vorgedachten Anwendung als Unterstützung im Konstruktionsalltag besteht.

Ein weiteres Ergebnis ist, dass, obwohl unabhängige Forscher den C&C²-Ansatz verwenden, viele der Anwendungen allein oder unter Beteiligung der Entwickler des C&C²-Ansatzes erfolgen. Er wird auch fast ausschließlich von deutschsprachigen Forschern verwendet und in deutschen Lehrbüchern wie Pahl/Beitz (Feldhusen und Grote 2013; Matthiesen 2021) beschrieben. Viele Anwendungsfälle nutzen internes Wissen über Modellierungsstrategien und Beispiele aus dem IPEK - Institut für Produkttechnik, an dem der Ansatz entwickelt wurde.

Häufig werden Adaptionen des ursprünglichen C&C²-Ansatzes für spezielle Fälle entwickelt. Dies entspricht der Intention des C&C²-Ansatzes, da er ein schlankes Modell zur Abbildung von GFZ sein soll, das situationsabhängig angepasst werden kann. Alle identifizierten Anwendungen verwendeten Systeme, die auf Referenzen aufgebaut waren, d. h. in eine Produktgenerationsentwicklung eingebunden waren. Da jedoch keine Anwendung eine explizite Wiederverwendung der erstellten Modelle zeigte, bleibt dieser Aspekt eine Herausforderung für die weitere Erforschung des Nutzens des C&C²-Ansatzes in der Produktgenerationsentwicklung.

Alle untersuchten Anwendungen zeigten die Anwendung des C&C²-Ansatzes in mechanischen Systemteilen von zumeist mechatronischen Systemen. In der Definition der Kernelemente erstreckt sich der Gültigkeitsbereich des C&C²-Ansatzes jedoch auch auf flüssige und gasförmige Elemente sowie magnetische und elektrische Felder. Hier zeigt sich eine Herausforderung in der Anwendbarkeit und auch im Nutzen des C&C²-Ansatzes. Um sie zu überwinden, ist eine Untersuchung notwendig, warum keine Anwendungen in diesen Systemen erfolgen und welche qualitativen Modellbildungsansätze stattdessen verwendet werden.

Da es sich bei den C&C²-Modellen um zweidimensionale konzeptionelle Modelle ohne zugrundeliegende Datenstruktur handelt, können sie pro Modell nicht so viele Informationen enthalten wie rechnergestützte ausführbare Produktmodelle. In vielen

Fällen werden unterschiedliche Betrachtungsebenen gezeigt, beispielsweise eine Modellübersicht und einzelne Detailmodelle. Die Handhabung dieser vermutlich sehr umfangreichen Modelle und ihr struktureller Zusammenhang bleibt unklar. (Grauberger et al. 2020d)

4.3 Projektanalyse zum C&C²-Ansatz

Dieses Kapitel basiert auf der Publikation (Grauberger et al. 2020a). Teile des folgenden Texts sind ohne Veränderung aus der Veröffentlichung in deutscher Form übernommen.

Zentrale Erkenntnisse:

- Experten im Umgang mit dem C&C²-Ansatz bewerten seine Elemente überwiegend als hilfreich und einfach nutzbar, haben aber teilweise große Probleme mit seiner zielführenden Anwendung.
- Im Aufbau von C&C²-Modellen wird das Finden einer geeigneten Visualisierung teilweise als extrem schwierig beschrieben.
- Die Abbildung von festgelegten Parametern in den Kernelementen der C&C²-Modellen ist eine Herausforderung.
- Eine Verknüpfung von C&C²-Modellen mit quantitativen Modellen findet selten statt.

Aus der in Kapitel 4.2 beschriebenen Untersuchung konnten Erkenntnisse über allgemeine Zwecke des Ansatzes und seine Anwendung in der Forschung zur Produktentwicklung abgeleitet werden. Es wurde jedoch deutlich, dass eine detailliertere Untersuchung von den Publikationen zugrundeliegenden Projekte erforderlich ist, um detailliertes Forschungspotenzial des C&C²-Ansatzes hinsichtlich der Erfolgskriterien Nutzen und Anwendbarkeit zu ermitteln.

4.3.1 Studiendesign

In der im Folgenden beschriebenen Projektanalyse werden Projekte untersucht, in denen der C&C²-Ansatz angewandt wurde. Hieraus werden Vorteile und Herausforderungen als Grundlage für die Weiterentwicklung identifiziert. Basierend auf einer ähnlichen Untersuchung der CPM durch Erbe (2018) werden zusätzlich auch Modelle analysiert, die den C&C²-Ansatz ersetzen oder erweitern könnten. Zunächst

wird untersucht, welche Vorteile und Herausforderungen sich aus dem Einsatz von Elementen und Techniken des C&C²-Ansatzes in Projekten, in denen Modellbildung von GFZ durchgeführt wird, ergeben. Weiter wird betrachtet, welche zusätzlichen Modelle in Projekten, in denen Modellbildung von GFZ durchgeführt wird, verwendet werden und wie sind sie mit C&C²-Modellen verknüpft sind.

Um die Anwendung des C&C²-Ansatzes und seine Verknüpfung mit weiteren Modellen der Gestaltung zu untersuchen, wird eine Umfrage über die Anwendung des C&C²-Ansatzes und weiterer Modelle für GFZ in Forschungs- und Entwicklungsprojekten durchgeführt. Die Umfrage soll Informationen über den Prozess der Modellbildung in den von den Teilnehmern selbst durchgeführten Projekten sammeln.

Teilnehmer der Studie: Die Teilnehmer der Umfrage werden so ausgewählt, dass sie eine gewisse Sicherheit im Umgang mit dem C&C²-Ansatz haben. Sie sollten in der Lage sein, den Ansatz zu verwenden, aber seine tatsächliche Anwendung bei Modellierungsaktivitäten in den Projekten war keine Voraussetzung. Dadurch können auch Erkenntnisse zur Entscheidung von Experten, einen ihnen bekannten Modellbildungsansatz nicht anzuwenden, erhoben werden. Forscher in der Produktentwicklung, die entweder direkt am IPEK - Institut für Produktentwicklung arbeiten, dort gearbeitet haben oder mit ihm zusammenarbeiten, wurden zur Teilnahme an der Umfrage kontaktiert.

Fragebogendesign: Der Fragebogen für die Umfrage wurde so aufgebaut, dass er sich an etablierte Modellbildungsprozesse aus der Literatur anlehnt. Das gewählte Konzept des Modellbildungsprozesses wurde aus dem MoSim-Schema von Günther und Velten (2014) abgeleitet. Sie schlagen Prozessschritte für den Aufbau mathematischer Modelle vor, die das Ziel haben, eine spezifische Frage zu einem System zu beantworten. Abbildung 4-7 stellt die Struktur des Fragebogens in Bezug auf die Phasen des MoSim-Schemas dar. Der originale Fragebogen findet sich in Anhang C.

MoSim-Schema	Abschnitt des Fragebogens	Inhalt der Abschnitte	Evaluation
Definition	Situationsanalyse	<ul style="list-style-type: none"> Eckdaten des durchgeführten Projekts 	<ul style="list-style-type: none"> Zahlen / Freitext
	Problemeingrenzung	<ul style="list-style-type: none"> Ziel und Fokus des Projekts Initialer Modellzweck 	<ul style="list-style-type: none"> Freitext Checkbox
Systemanalyse	Analyse	<ul style="list-style-type: none"> Analysetechniken Basis der Visualisierung 	<ul style="list-style-type: none"> Likertskalen / Freitext
Modellierung	Modellbildung	<ul style="list-style-type: none"> Kernelemente des C&C²-Ansatzes Zusätzliche nicht-ausführbare Modelle Zusätzliche ausführbare Modelle 	<ul style="list-style-type: none"> Likertskalen / Freitext
Simulation			
Validierung	Verifikation / Validierung	<ul style="list-style-type: none"> Hypothesenformulierung Hypothesenprüfung 	<ul style="list-style-type: none"> Freitext / Checkbox
	Modellnutzen	<ul style="list-style-type: none"> Finaler Modellzweck Modellierungsergebnisse 	<ul style="list-style-type: none"> Freitext / Checkbox

Abbildung 4-7: Struktur des Fragebogens nach dem MoSim Schema von Günther und Velten (2014), übersetzt aus (Grauberger et al. 2020a)

Der Schritt Definition aus dem MoSim-Schema ist in zwei Abschnitte unterteilt, Situationsanalyse und Problemeingrenzung. Im Abschnitt Situationsanalyse geben die Teilnehmer einen kurzen Überblick über das Projekt. Es wird nach der Dauer des Projekts und den am Projekt beteiligten Teammitgliedern gefragt. Zusätzlich wird eine Möglichkeit zur Freitextantwort über die Umstände rund um das Projekt gegeben.

Im Abschnitt Problemeingrenzung wird analysiert, wie das Ziel und der Schwerpunkt des Projekts festgelegt wurden. Hier wird auch der initiale Modellzweck untersucht. Die in den Ankreuzfeldern angegebenen Zwecke werden nach Andreasen et al. (2015) unterteilt (vgl. Kapitel 2.3). Beispiele für diese Zwecke wurden im Fragebogen angegeben, z. B. "ein CAD-Modell aufbauen" für "Produktdefinition" oder "Strukturierung von Informationen" für "Wissensverwaltung".

In den Abschnitten Analyse und Modellbildung werden Likertskalen verwendet, um kategorische Daten zu den Erfolgskriterien Nutzen und Anwendbarkeit von Blessing und Chakrabarti (2009) zu sammeln. Dazu wurden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer gefragt, ob sie das Element für hilfreich halten (Nutzen) und ob es einfach anzuwenden ist oder nicht (Anwendbarkeit). Die Bewertung dieser Kriterien erfolgte anhand einer fünfstufigen Likertskala von „Stimme nachdrücklich zu“ bis "Wider-

spreche nachdrücklich" mit dem neutralen Punkt „Stimme weder zu noch widerspreche ich“. Zur Erläuterung der getroffenen Entscheidungen stand ein freies Textfeld zur Verfügung.

Im Abschnitt Analyse werden Techniken und Modelle für die Visualisierung untersucht, die in der Phase der Systemanalyse verwendet werden. Hinsichtlich der Techniken werden spezifische Antworten für die drei Techniken Zoom, Shift und Perspektivenwechsel des C&C²-Ansatzes gefordert. Die Teilnehmer antworteten, ob sie diese Techniken verwendeten und bewerteten sie gegebenenfalls auf der Likertskala. Zusätzliche Analysetechniken konnten hinzugefügt und ebenfalls bewertet werden, falls sie verwendet wurden. Eine Dropdown-Vorlage für die Bewertung mit Likert-Skalen wurde zur Verfügung gestellt. Bezüglich der Modelle für die Visualisierung wurde gefordert, anzugeben, welche Modelle verwendet wurden und diese analog zu den Techniken zu bewerten.

Im Abschnitt Modellbildung geht es um die eigentliche Modellbildungsphase der Projekte. Hier wurden allgemeine Fragen zu den gebildeten Modellen und spezifische Fragen zu Elementen des C&C²-Ansatzes gestellt. Im Hinblick auf den C&C²-Ansatz wurden die Modellierung von Systemzuständen aus dem C&C²-Sequenzmodell, die Kernelemente WFP, LSS und Connector sowie die Parameter in den Kernelementen bewertet und die Auswahl erläutert. In den allgemeinen Fragen wurden die Teilnehmer gefragt, welche anderen Modelle sie verwenden. Die Modelle werden nach Sokolowski und Banks (2010) in nicht-ausführbare Modelle und ausführbare Modelle unterschieden. Es werden auch Beispiele für diese Modelle genannt, z. B. Skizzen als nicht ausführbare Modelle und ausführbare Mehrkörpersimulationen.

Im Abschnitt Verifikation und Validierung liegt der Schwerpunkt auf dem Testen der Hypothesen, die während der Modellbildungsphase entwickelt wurden. Es wird gefragt, ob Hypothesen formuliert wurden und falls ja, wie sie geprüft wurden.

In der Modellnutzung als letzter Abschnitt des Fragebogens werden die Teilnehmer gebeten, den Zweck der Modelle nach Andreasen et al. (2015) erneut zu kategorisieren, nun im Rückblick auf die Projektergebnisse. Die Nutzung der im Projekt aufgebauten Modelle wird dahingehend untersucht, ob ein Produktkonzept entwickelt und/oder ein physischer oder virtueller Prototyp aufgebaut wurde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Fragebogen drei Arten von Daten enthält:

- Quantitative Daten zu den Projekten (Dauer, beteiligte Personen etc.) und darüber, welche Modellbildungstechniken und verwendet wurden.

- Kategorische Daten aus den Likertskalen der Bewertung von Nutzen und Anwendbarkeit durch die Teilnehmer.
- Qualitative Daten aus den Erläuterungen der Evaluation und zusätzliche Freitextkommentare.

Datenauswertung: Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden alle drei Datentypen ausgewertet. Die quantitativen Daten werden zur Klassifizierung der Projekte und der Häufigkeit der Modellnutzung verwendet. Die Likertskalen werden nach Robbins und Heiberger (2011) ausgewertet, um einen Überblick über die Bewertung von Nutzen und Anwendbarkeit der verwendeten Modelle und Techniken zu geben. Die qualitativen Daten aus den Kommentaren der Teilnehmer werden von den Autoren nach den von Okoli und Pawlowski (2004) beschriebenen Delphi-Methoden ausgewertet. In Phase 1 wird auf der Grundlage der gesammelten Kommentare ein Brainstorming durchgeführt. In Phase 2 werden die Kommentare nach Möglichkeit in übergreifende Aussagen eingegrenzt. In Phase 3 werden die konsolidierten Kommentare aus der vorhergehenden Phase in eine Rangfolge gebracht und in den Ergebnisteil integriert. Die zusätzlichen Modelle werden geclustert, indem eine Übersicht über alle genannten Modelle erstellt und die Modelle dann nach übergreifenden Begriffen sortiert werden, die im Ergebnisteil beschrieben werden.

4.3.2 Ergebnisse

Es gab 23 vollständige Datensätze als Rückläufer der Umfrage. Von diesen wurde in 20 Datensätzen der C&C²-Ansatz genutzt, 3 Projekte nutzten ausschließlich andere Modelle. Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage wurden die 20 Datensätze, in denen der C&C²-Ansatz genutzt wurde, ausgewertet. Die subjektive Bewertung von Kernelementen und Techniken des C&C²-Ansatzes hinsichtlich Anwendbarkeit und Nutzen wird im Folgenden beschrieben:

Es wurden die drei Techniken „Zoom“, „Shift“ und „Perspektivenwechsel“ nach der Beschreibung in (Matthiesen 2021) bewertet. Die Auswertung ist in Abbildung 4-8 dargestellt.

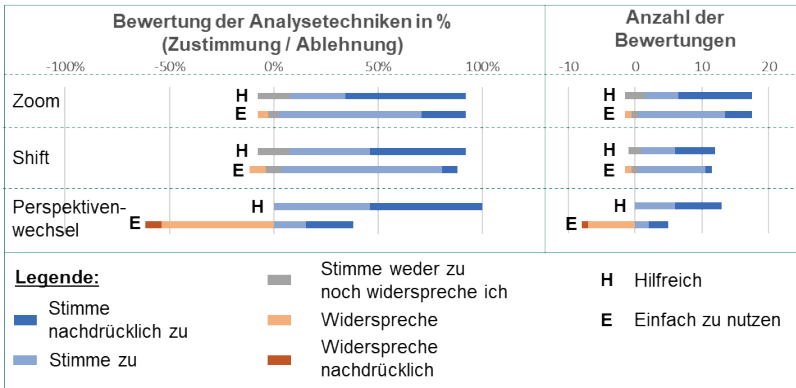


Abbildung 4-8: Bewertung der Techniken zum C&C²-Ansatz nach (Grauberger et al. 2020a)

Diese Auswertung folgt dem Vorgehen von Robbins und Heiberger (2011). Hierbei werden aus dem Datensatz zwei Diagramme abgeleitet. Das linke Diagramm zeigt die prozentuale Verteilung der Zustimmung/Ablehnung der Teilnehmer, welche die entsprechende Frage beantwortet haben. Der Diagrammbereich deckt dabei 200% ab (-100% für ausschließlich negative Bewertungen bis + 100% für ausschließlich positive). Die Farbcodierung der Balken zeigt den Anteil der leicht (blass blau / blass orange) und stark (blau / orange) positiven oder negativen sowie der neutralen Bewertungen. Die neutralen Bewertungen verteilen sich gleichmäßig um die 0-Linie.

Das rechte Diagramm zeigt die absolute Anzahl an Bewertungen, wobei die Verteilung in negativ und positiv identisch zum linken Diagramm ist. Dieses Diagramm ist in Auswertungen wichtig, in denen Fragen nicht verpflichtend beantwortet werden müssen, wodurch sich starke Abweichungen in der Anzahl der Antworten ergeben können. Diese wären in der prozentualen Auswertung (linkes Diagramm) nicht identifizierbar. Mit diesem Doppel-Diagramm ist sowohl die Verteilung innerhalb einer Bewertung als auch die absolute Anzahl einer Bewertung erkennbar.

Die Technik Zoom war die am häufigsten verwendete Technik in den Projekten (siehe Anzahl-Diagramm, rechte Seite in Abbildung 4-8). Sie wurde als hilfreich und einfach zu nutzen bewertet. Die zusätzlich erfassten Freihand-Kommentare zeigen, dass sie auf zwei verschiedene Arten verwendet wurde. Die eine war die Untersuchung von technischen Zeichnungen oder CAD-Modellen, bei denen die Technik Zoom im virtuellen Modell (CAD) durchgeführt wird. Die andere war die Untersuchung eines realen Systems mittels Mikroskopie. Die Technik Shift wurde nicht so oft verwendet (siehe Anzahl-Diagramm, rechte Seite in Abbildung 4-8), aber auch

als hilfreich und einfach zu nutzen bewertet. Die Kommentare zeigten, dass sie oft in großen Systemen verwendet wurde, in denen viele Systemteile untersucht werden müssen. Die Technik Perspektivenwechsel wurde als hilfreich bewertet, war aber schwierig zu nutzen. In den Kommentaren wurde sie als hilfreich bei der Bearbeitung von Problemen beschrieben, die dreidimensionale Zusammenhänge betreffen. Diese wurden in verschiedene 2D-Ansichten unterteilt. In anderen Kommentaren wurde die umfangreiche Systemvorbereitung (Mikroskopie über Spiegel oder Entfernung von Systemteilen, um Kernelemente beobachten zu können) als Herausforderung genannt. Manchmal war die Anwendung des Perspektivenwechsels in realen Systemen unmöglich und konnte nur im CAD-Modell des Systems erfolgen.

Anschließend wurden die Elemente des C&C²-Ansatz untersucht. Sie wurden ähnlich zu den Techniken über Likert-Skalen ausgewertet und sind in Abbildung 4-9 dargestellt.

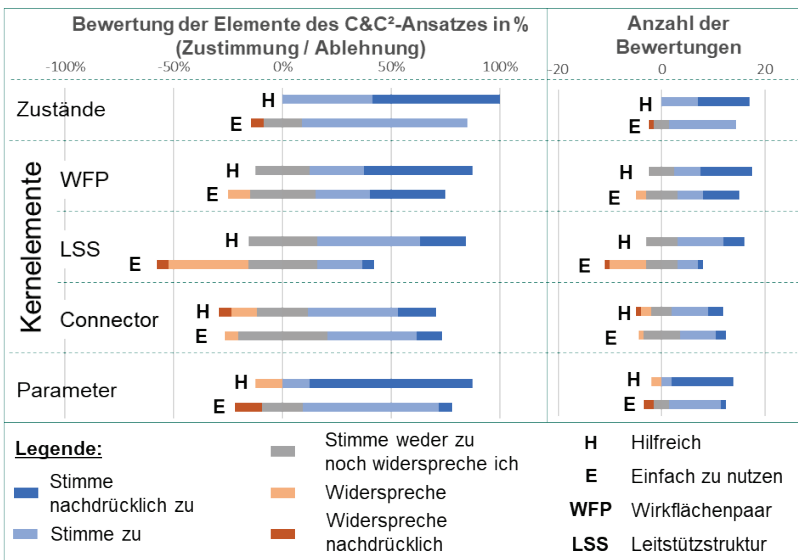


Abbildung 4-9: Bewertung der C&C²-Elemente nach (Grauberger et al. 2020a)

Insgesamt wurde nur das Kernelement WFP in allen 20 Projekten, die C&C²-Modelle verwenden. In 19 Projekten wurden LSS modelliert, in jeweils 17 Connectoren und Zustände und in 16 Parameter verwendet. Die Abweichung von formal korrekt

ten C&C²-Modellen, die alle Kernelemente beinhalten, wurden als durch pragmatische Modellierung verursacht angemerkt. Beispielsweise standen nur WFPs im Fokus und ein formal korrektes Modell wurde nicht für notwendig erachtet. Alle verwendeten Elemente wurden als überwiegend hilfreich eingestuft.

Die Modellierung der Systemzustände wurde als sehr hilfreich und meist einfach zu handhaben angesehen, jedoch zeigten einige wenige Fälle extreme Schwierigkeiten. In den Kommentaren wurde die Strukturierung des Systemverhaltens meist als hilfreich für die Identifizierung von GFZ angesehen, z. B. durch Clustern von Effekten in Videos des realen Systemverhaltens. Eine Bemerkung bezog sich auf die strukturelle Beschränkung des C&C²-Sequenzmodells, die weiterführende Grundlagenforschung zur Erreichung des Projektziels notwendig machte.

Das WFP wurde als das hilfreichste der drei Kernelemente des C&C²-Ansatzes bewertet. Die Kommentare zu den Herausforderungen betrafen die Schwierigkeiten, WFPs in realen Systemen zu finden und in 3D-Visualisierungen darzustellen. LSS wurden ebenfalls als hilfreich eingestuft, jedoch wurde eine breite Streuung in Bezug auf die einfache Nutzung sichtbar. In Kommentaren wurden sie entweder als einfache Verbindungen von WFPs oder als extrem schwierig zu modellieren betrachtet, insbesondere wenn ein Fehlverhalten eines Systems untersucht wurde. Die Connectoren wurden in einem breiten Spektrum bewertet, was ihren Nutzen und die einfache Nutzung betrifft. In den Kommentaren wurde angemerkt, dass ein Connector einerseits häufig nur eine Kraft enthält, die ihn etwas trivial macht, oder aber dass viele unbekannte Einflussgrößen in ihm versteckt sein könnten.

Parameter in den Kernelementen waren die am wenigsten verwendeten Elemente des C&C²-Ansatzes. Wenn sie modelliert wurden, wurden sie bezüglich ihres Nutzens von allen Elementen des C&C²-Ansatzes am höchsten bewertet. In Kommentaren wurde ihre Anwendung als Grundlage für Hypothesen und ausführbare Modelle auf der Grundlage der C&C²-Modelle genannt. Sie sind an sich jedoch kein Kernelement, und das Fehlen einer Standardisierung ihrer Darstellung wurde als herausfordernd bezeichnet. In zwei Kommentaren wurden Schwierigkeiten bei der Suche und Strukturierung der Parameter erwähnt.

Anschließend wurden die Teile des Fragebogens ausgewertet, die sich auf die Verwendung zusätzlicher Modelle in den untersuchten Projekten beziehen. Es wird analysiert, welche Modelle und Modellbildungstechniken verwendet werden und wie sie mit den erstellten C&C²-Modellen zusammenhängen. Insgesamt wurden 84 zusätzliche Modelle in den 23 Projekten verwendet.

Bei der Zuordnung zu den vorgegebenen Kategorien traten Schwierigkeiten auf. Die Teilnehmer hatten unterschiedliche Auffassungen von der Zuordnung ihrer Modelle

zu den Kategorien Analysetechnik, Visualisierung, nicht ausführbare Modelle und ausführbare Modelle (siehe auch Abbildung 4-7). Daher sammelten die Autoren alle erwähnten zusätzlichen Modelle und gruppieren sie, indem übergreifende Begriffe zugewiesen wurden. Die erwähnten Modelle und übergreifenden Begriffe werden in Abbildung 4-10 dargestellt.

Übergeordneter Begriff	Beschreibung des Begriffs	Erwähnte Modelle (Anzahl der erwähnten Fälle)
MBSE	Modelle zur Systembeschreibung, die auf MBSE Prinzipien basieren	SysML (2), Internes Blockdiagramm (1), Blockdefinitionsdiagramm (1)
Messungen	Modelle des (quantitativen) Systemverhaltens	Messungen (4), Regressionsmodell (2), DoE (1), Drehmoment-Charakteristik (1), Messdaten (1)
Simulationen	Ausführbare mathematische Modelle des Systemverhaltens	Mehrkörpersimulation (8), Berechnungen (4), FEM Simulation (3)
Grafische Modelle	Modelle, die die Produktgeometrie definieren	CAD (23), Skizzen (8), Technische Zeichnungen (5), Modell nach Mattheck (1), Geometrische Relationen(1)
Beobachtungen	Modelle zur Beobachtung des Verhaltens des realen Systems	Querschnitte (3), Fotos (3), Highspeed-Videos (2), Schnittmodell (1), Verschleißanalyse (2), Video-basierte Modelle (2)
Systemanalyse Werkzeuge	Modelle für die Strukturanalyse technischer Systeme	Funktionsbaum (3), Ishikawa-Diagramm (1), FMEA (1), FTA (1), Parameter Mindmap (1)
Prototypen	Physikalische Modelle des Produkts oder seiner Aspekte	Prototypen (6), Reale Systemteile (5), 2D Prototypen (2), Referenzsystem (1)

Legende: MBSE = Model-based systems engineering; DoE = Design of experiments; FEM = Finite Element Modell; CAD = Computer-aided Design; CT = Computertomographie; FMEA = Failure mode and effects analysis; FTA = Fault tree analysis;

Abbildung 4-10: Beschreibung von Gruppierungen für die Modellanalyse nach (Grauberger et al. 2020a)

Die Verbindung der zusätzlich genutzten Modelle wurde anhand der Beschreibungen in den Freitextfeldern analysiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-11 dargestellt.

Modellcluster	Verknüpfung genannt	Keine Verknüpfung	Unklare Anmerkung
Model-based systems engineering	50.0 % (2/4)	0.0 % (0/4)	50.0 % (2/4)
Messdatenbasierte Modelle	10.0 % (1/10)	20.0 % (2/10)	70.0 % (7/10)
Simulationen	20.0 % (3/15)	40.0 % (6/15)	40.0 % (6/15)
Graphische Modelle	65.7 % (23/35)	2.9 % (1/35)	31.4 % (11/35)
Beobachtungsbasierte Modelle	71.4 % (10/14)	0.0 % (0/14)	28.6 % (4/14)
Systemanalyse-Tools	61.5 % (8/13)	23.1 % (3/13)	15.4 % (2/13)
Prototypen	66.7 % (10/15)	6.7 % (1/15)	26.7 % (4/15)

Abbildung 4-11: Verknüpfung von Modellen mit C&C²-A nach (Grauberger et al. 2020a)

Bei 50 % der Projekte, die MBSE-Modelle verwenden, wurde eine Verbindung zum C&C²-Ansatz erwähnt. In den Kommentaren wurden C&C²-Modelle als nützlich beschrieben, um die Modellierung von Interaktionen an Systemgrenzen zu unterstützen. Die messdatenbasierten Modelle und Simulationen zeigten einen geringen Anteil an Anbindung an den C&C²-Ansatz. In den Kommentaren wurde auf fehlende Kompatibilität hingewiesen. In den Projekten, in denen z. B. bereits Prüfstände existierten und die C&C²-Modelle nicht mehr verwendet wurden, wurden später oft messdatenbasierte Modelle eingesetzt. Grafische Modelle, beobachtungsbasierte Modelle, Systemanalyse-Tool und Prototypen wurden meist in Verbindung mit dem C&C²-Ansatz verwendet. Die Kommentare zeigten, dass grafische Modelle für die Erstellung von C&C²-Modellen notwendig waren, insbesondere CAD wurde oft als Grundlage für einfache und schnelle Visualisierungen verwendet. Grafische Modelle waren auch für die Darstellung von Systembeobachtungen und das Verständnis des Systemverhaltens nützlich. In anderen Kommentaren wurde beschrieben, dass C&C²-Modelle für 3D-Probleme nur schwer zu verwenden sind. Auch die Systemanalyse-Tools waren oft mit dem C&C²-Ansatz verbunden. Die Kommentare zeigten, dass eine Kombination mit C&C²-Modellen hilfreich war, um das System und seine Zustände zu strukturieren. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zusätzliche Modelle oft in Kombination mit dem C&C²-Ansatz verwendet werden, quantitative Modelle jedoch selten mit ihm verbunden genutzt wurden. In einigen Fällen blieb aus der vorliegenden Beschreibung unklar, ob es einen Zusammenhang zwischen anderen Modellen und dem C&C²-Ansatz gibt.

4.3.3 Diskussion

Aus dieser Studie können Erkenntnisse zu Nutzen und Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes abgeleitet werden. Durch die Aussagen der Teilnehmer werden Vorteile hinsichtlich der Anwendbarkeit deutlich, da die Elemente des C&C²-Ansatzes als

relativ einfach in der Anwendung bewertet werden. Sowohl die Elemente als auch die Techniken des C&C²-Ansatzes werden hinsichtlich ihres Nutzens als überwiegend hilfreich bewertet. Insbesondere die Techniken Zoom und Shift werden als sehr hilfreich und einfach in der Anwendung bewertet und kommentiert. Zoom wird als sehr intuitiv erwähnt. Shift wird als hilfreich bei der Analyse von großen und komplizierten Systemen genannt. Perspektivwechsel wird als sehr hilfreich bei der Identifizierung unbekannter GFZ in 3D-Systemen genannt. Diese Ergebnisse zeigen den C&C²-Ansatz als einen einfach zu verwendenden Modellierungsansatz, der in Projekten, die sich mit GFZ befassen, unterstützen kann. Herausforderungen ergeben sich bei der Modellierung verschiedener Zustände und bei der Frage, wann welche Elemente des C&C²-Ansatzes angewendet werden sollen. Manchmal werden Elemente nur aus formalen Gründen modelliert. In Bezug auf die LSS reichen die Kommentare von sehr hilfreich bis hin zu "es wird nur verwendet, um WFPs zu verbinden". Schwierigkeiten werden darin erwähnt, wie der Kraftfluss durch das System dargestellt werden kann und wie die LSS zielführend modelliert werden können. Dies deutet auf einen Mangel an Unterstützung bei der Verwendung von LSS hin. Die Connectoren werden oft nur aus formalen Gründen verwendet, was darauf hindeutet, dass die Teilnehmer Schwierigkeiten hatten, sie entsprechend ihrem Zweck zu verwenden. Dies könnte auf eine mangelnde Schulung zurückzuführen sein, da die Connectoren erst seit 2013 gelehrt werden, als die meisten Teilnehmer bereits die Grundausbildung in Maschinenkonstruktionslehre abgeschlossen hatten, in der der C&C²-Ansatz gelehrt wird. Die Parameter sind schwierig zu verwenden, da es keine formale Möglichkeit gibt, sie im C&C²-Ansatz zu modellieren. Die Technik des Perspektivenwechsels wird als sehr schwierig bewertet, insbesondere in realen Systemen, wo aufwändige Ausrüstung notwendig ist und manchmal ihre Anwendung unmöglich war. Diese Ergebnisse weisen auf die Notwendigkeit einer Unterstützung bei der Anwendung von Elementen des C&C²-Ansatzes und der formalen Integration von Parametern hin.

Neben den C&C²-Modellen wird eine Vielzahl von Modellen verwendet, von denen fast alle als hilfreich eingestuft werden. Hinsichtlich der Bewertung der einfachen Nutzbarkeit werden Unterschiede zwischen den Clustern aufgezeigt, da z. B. Modelle zur Produktdefinition wie CAD meist als einfach zu bedienen eingestuft werden, während Prototypen, Berechnungen/Simulation und Systembeobachtung zumindest teilweise sehr schwierig nutzbar sind. Diese Modelle werden jedoch häufig verwendet, um die notwendigen Erkenntnisse zu gewinnen. Die am häufigsten verwendeten Modelle sind die graphischen Modelle mit Schwerpunkt CAD, die als Grundlage für Projekte zur Untersuchung von GFZ angegeben werden. CAD wird neben der offensichtlichen Verwendung als Basis für physische Systemprototypen, die ein 3D-CAD-Modell für die Fertigung benötigen, oft auch für einfache und schnelle Visualisierungen verwendet. Reale Systeme oder Prototypen werden zur

Visualisierung der Details und des physischen Verhaltens zusätzlich zu den CAD-Modellen verwendet. In fünf der sieben Cluster sind 50% oder mehr der Modelle mit dem C&C²-Ansatz verbunden. Die höchste Rate wird in der Systembeobachtung gezeigt, wo fast 3/4 der Modelle als Visualisierungsgrundlage für den C&C²-Ansatz verwendet werden. Auch Prototypen werden oft mit dem C&C²-Ansatz kombiniert, teils als Visualisierungsgrundlage und teils aus den C&C²-Modellen zum Testen von Hypothesen synthetisiert. Quantitative Modelle wie messungsbasierte Modelle oder Berechnungen/Simulationen werden selten mit C&C²-Modellen in Verbindung gebracht. Sie werden zur Quantifizierung von GFZ verwendet und benötigen deshalb Parameter als Input. Diese Verbindung ist schwierig herzustellen, da die Parameter noch nicht formell in den C&C²-Ansatz integriert sind.

Zusammenfassend ermöglichte diese Studie die Identifizierung bisher unbekannter Forschungspotentiale zum C&C²-Ansatz. Einschränkungen bezüglich der Untersuchung sind die retrospektive Analyse und der Fokus der Projekte auf GFZ. Die retrospektiven Einschränkungen ergeben sich aus der langen Projektdauer, bei der Details der Modellierung von den Projektmitarbeitern möglicherweise vergessen wurden. Auch waren an fast allen Projekten mehr als ein Projektmitarbeiter beteiligt, die Daten wurden jedoch durch Befragung eines der Projektmitglieder gesammelt. Die Untersuchung erstreckt sich nicht auf die typische Produktentwicklung im Unternehmensumfeld, sondern nur auf die Teile, in denen Unternehmen Forschungsbedarf für die Produktentwicklung haben und Forschungseinrichtungen konsultieren. (Grauberger et al. 2020a)

4.4 Zusammenfassung der Analyse

Die Forschungsfrage 1 der Analyse *Wie wird die Modellbildung von GFZ aktuell mit C&C²-Ansatz durchgeführt und welche Herausforderungen bestehen dabei?* kann aus den gewonnenen Erkenntnissen wie folgt beantwortet werden:

Der C&C²-Ansatz wird schwerpunktmäßig in der Analyse unbekannter GFZ eingesetzt. Dabei wird er auch für Aufbau und Nutzung von quantitativ-rechnerunterstützten Modellen genutzt. Der C&C²-Ansatz bietet damit eine Möglichkeit, qualitative Modelle des GFZ zu bilden und so die Gestaltung zu unterstützen. In der Analyse werden zudem verschiedene Herausforderungen identifiziert. Als zentrale Herausforderung wird dabei die unzureichende Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes identifiziert, welche die Modellbildung erschwert und damit sowohl die Anwendung als auch die Forschung am C&C²-Ansatz behindert. Diese und auch die drei weiteren Herausforderungen werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

- *Unzureichende Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes.* Der C&C²-Ansatz ist selbst für Modellbildungsexperten mit Zugriff auf umfassende Unterlagen und Möglichkeiten zur Beratung mit weiteren Experten teilweise schwierig anwendbar. Es existieren zudem kaum Anwendungen ohne Beteiligung der Entwickler des Ansatzes, obwohl der Bedarf nach Unterstützung in dieser Art von Modellbildung durch viele Projekte mit Industriebeteiligung deutlich ist. Die zentrale Herausforderung führt dadurch zu einer Forschungsbarriere durch unbekanntem Nutzen des C&C²-Ansatzes in der Gestaltung: Aktuell kann keine Aussage über den Nutzen der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz getroffen werden. Dadurch ist eine zielführende Weiterentwicklung des C&C²-Ansatzes nicht möglich, da durch die fehlende Anwendbarkeit keine Überprüfung des Nutzens von bestehenden und weiterentwickelten Elementen des C&C²-Ansatzes möglich ist.

Diese zentrale Herausforderung wird durch die Entwicklung des EnhanCE Modelling als Methodenschulung zur Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz als das Ziel dieser Forschungsarbeit adressiert. Des Weiteren wurden die folgenden drei Herausforderungen identifiziert:

- *Verknüpfung zu weiteren Modellen der Gestaltung.* Der C&C²-Ansatz ist durch die in den Kernelementen modellierbaren Parameter prinzipiell zu weiterführenden Modellen in der Gestaltung anschlussfähig. Jedoch findet die Verknüpfung von C&C²-Modellen mit quantitativen Modellen selten statt.
- *Überprüfung von Annahmen.* Der C&C²-Ansatz eignet sich, um implizites Wissen zu GFZ schnell und einfach zu explizieren. Eine Überprüfung von Annahmen wird aktuell jedoch nicht unterstützt, wodurch sie erst spät durch die Analyse quantitativer Modelle erfolgt. Es bleibt häufig unklar, wie C&C²-Modelle aufgebaut und geprüft werden müssen, um die Korrektheit von in ihnen getroffene Annahmen abzusichern.
- *Modellbildung in komplizierten und komplexen Systemen.* Der C&C²-Ansatz wurde in vielen Projekten zur Analyse komplizierter und komplexer Systeme eingesetzt. Hierbei zeigte sich, dass sowohl der Modellaufbau als auch die anschließende Modellnutzung eine Herausforderung darstellten. Die Identifikation geeigneter Systemabbilder war teilweise schwierig. Weiter wurde kein Fall einer Wiederverwendung von C&C²-Modellen identifiziert, was insbesondere im Rahmen der Produktgenerationsentwicklung relevant ist.

Diese Herausforderungen werden im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht adressiert, da zunächst eine Lösung für die zentrale Herausforderung notwendig

ist, bevor belastbare Aussagen zu den weiteren Herausforderungen getroffen werden können. Im Ausblick (Kapitel 8) findet sich eine Übersicht über initiale Forschungsarbeiten zu diesen Herausforderungen.

5 EnhanCE Modelling – Entwicklung der Methodenschulung

In diesem Kapitel wird EnhanCE Modelling als Methodenschulung zur Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz entwickelt. EnhanCE Modelling legt den Fokus auf die Vermittlung des C&C²-Ansatzes, da die zentrale Herausforderung der unzureichenden Anwendbarkeit dadurch überwunden werden kann, dass Novizen im Umgang mit dem C&C²-Ansatz gezielt Fähigkeiten der Experten vermittelt werden.

Weiter werden Möglichkeiten zur Untersuchung der Erfolgsfaktoren Anwendbarkeit und Nutzen in den Aufbau der Methodenschulung integriert. Dadurch wird eine Aussage dazu möglich, wie weit und in welcher Form die methodische Unterstützung der Modellbildung von GFZ in der Gestaltung auf Basis des C&C²-Ansatzes als das Ziel dieser Forschungsarbeit erreicht wurde. Eine Übersicht der Entwicklung ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

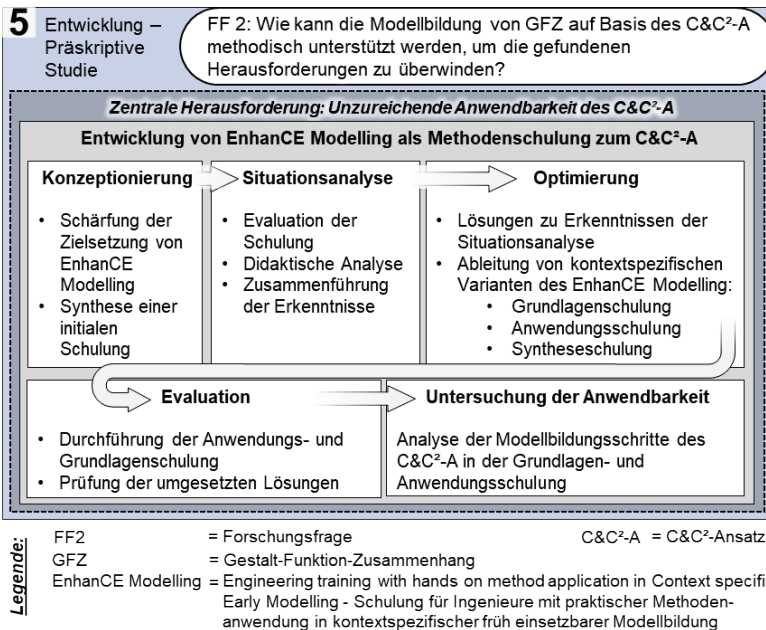


Abbildung 5-1: Übersicht der Aktivitäten in der Entwicklung von EnhanCE Modelling als Methodenschulung zur Vermittlung des C&C²-Ansatzes

Zunächst wird in der *Konzeptionierung* das grundlegende Konzept des EnhanCE Modelling erstellt und eine initiale Schulung ausgearbeitet. In der darauffolgenden *Situationsanalyse* wird diese Schulung evaluiert und eine Analyse ihrer didaktischen Elemente durchgeführt. Die aus Evaluation und struktureller Analyse gewonnenen Erkenntnisse werden zusammengeführt und priorisiert. In der *Optimierung* werden Lösungen für die gewonnenen Erkenntnisse aus der Situationsanalyse erarbeitet und umgesetzt. Es werden drei Varianten der Schulung abgeleitet, um die Vermittlung des C&C²-Ansatzes in verschiedenen Kontexten zu unterstützen. In der *Evaluation* werden die umgesetzten Lösungen auf ihre Wirksamkeit geprüft.

In der abschließenden *Untersuchung der Anwendbarkeit* werden in den Varianten der Grundlagen- und Anwendungsschulung des EnhanCE Modelling die Schritte der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes hinsichtlich Schwierigkeiten in ihrer Anwendbarkeit untersucht. Hierdurch wird eine Aussage zur Anwendbarkeit der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes möglich.

Das folgende Kapitel basiert auf der Publikation (Grauberger et al. 2021). Teile des folgenden Texts sind ohne Veränderung aus der Veröffentlichung in deutscher Form übernommen.

Zentrale Erkenntnisse:

Durch EnhanCE Modelling wird es auch für Novizen im Umgang mit dem C&C²-Ansatz möglich, die Schritte seiner Modellbildungsmethode so durchzuführen, dass Erkenntnisse zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen gewonnen und modelliert werden können.

In der Entwicklung von EnhanCE Modelling konnten Schwachstellen der initialen Schulung durch gezielte Evaluation und Implementierung von Lösungen der Bildungsforschung behoben werden.

Die Ableitung von drei Schulungsvarianten ermöglicht den kontextspezifischen Einsatz des EnhanCE Modelling abhängig von den gewünschten Lernzielen, die in der Modellbildung erreicht werden sollen.

Die in EnhanCE Modelling integrierten Praxisteile ermöglichen die Untersuchung der Erfolgsfaktoren Anwendbarkeit und Nutzen der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz

5.1 Studiendesign der Entwicklung von EnhanCE Modelling

Die Entwicklung von EnhanCE Modelling als Methodenschulung zum C&C²-Ansatz gliedert sich in die oben beschriebenen fünf Schritte *Konzeptionierung*, *Situationsanalyse*, *Optimierung*, *Evaluation* und *Untersuchung der Anwendbarkeit*. Das methodische Vorgehen in diesen Schritten wird im Folgenden erläutert.

Konzeptionierung: In der Konzeptionierung wird zunächst das grundlegende Konzept des EnhanCE Modelling erstellt. Hierbei wird die Vermittlung des C&C²-Ansatzes an die SchulungsteilnehmerInnen durch das Zusammenspiel von Lernziel, Aktivitäten und Erfolgsprüfung nach dem Constructive Alignment (vgl. Kapitel 2.6.1) und die Nutzung des Sandwich-Prinzips (vgl. Kapitel 2.6.2) geplant. Die Erforschung

von Erfolgsfaktoren wird durch die Festlegung von In- und Output in den Abschnitten der Schulung geplant. Anschließend werden verfügbare Informationen zum C&C²-Ansatz aus Veröffentlichungen und institutsinternen Projektunterlagen gesammelt, um aus dem generischen Konzept eine konkrete Schulung ableiten zu können. Hier werden auch bestehende Erfahrungen aus der Lehre zum C&C²-Ansatz genutzt. Es werden Modellbildungsexperten des IPEK – Institut für Produktentwicklung in Diskussionen zu Inhalten und Struktur der Schulung einbezogen. Parallel werden Beispielsysteme mit herausfordernden GFZ identifiziert, die für ihre Nutzung in EnhanCE Modelling aufbereitet werden.

Situationsanalyse: Die konzeptionierte initiale Schulung wird in drei Veranstaltungen mit TeilnehmerInnen unterschiedlicher beruflicher Bildung durchgeführt und evaluiert. Dies bildet die Grundlage der Situationsanalyse. Die TeilnehmerInnen haben unterschiedliche Kenntnisse über den C&C²-Ansatz, die von Novizen ohne Kenntnisse bis hin zu Experten in der Modellbildung reichen. Im Rahmen der Situationsanalyse wird die Unterschiedlichkeit der Wissensstände der Teilnehmer als erwünscht angesehen, da dies die Bandbreite der aufdeckbaren Schwierigkeiten erhöht. Experten sehen andere Schwierigkeiten als Novizen und da EnhanCE Modelling schwerpunktmäßig Novizen, aber auch Experten adressieren soll, ist die Berücksichtigung einer möglichst großen Bandbreite von Schwierigkeiten günstig.

Die erste Evaluation fand im Rahmen einer eintägigen Weiterbildungsveranstaltung statt, in der 14 wissenschaftliche MitarbeiterInnen von Produktentwicklungslehrstühlen der WiGeP (Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung) teilnahmen, um sich in der Modellbildung in der Gestaltung weiterzubilden. Einige der TeilnehmerInnen hatten bereits während ihres Studiums oder ihrer Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiter vom C&C²-Ansatz gehört, waren jedoch mit den Details und der Modellbildungsmethode nicht vertraut.

Die zweite Evaluation fand im Rahmen des Masterstudiengangs Gerätekonstruktion mit 18 Studierenden des Maschinenbaus am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) statt. Alle TeilnehmerInnen hatten den C&C²-Ansatz in ihren Vorlesungen kennengelernt. Ein Teilnehmer nutzte den C&C²-Ansatz in seiner Bachelorarbeit und besaß dadurch Expertise in der Modellbildung.

Die dritte Evaluation fand im Rahmen einer Methodenschulung für 11 ProduktentwicklerInnen aus einem Unternehmen statt. Drei Teilnehmer hatten am KIT studiert und besaßen deshalb bereits Basiskenntnisse zum C&C²-Ansatz, ansonsten war der C&C²-Ansatz unbekannt.

In den Evaluationen wurde neben anderen Fragen auch die Freitext-Evaluationsfrage "Was könnte verbessert werden?" gestellt. Die Antworten auf diese Fragen

werden in der Situationsanalyse genutzt, da sie konkrete Schwachstellen der Schulung in Bezug auf Inhalt und Struktur aufzeigen.

Die Antworten werden anschließend in einem Workshop mit Modellbildungsexperten nach thematischer Ähnlichkeit kategorisiert. Die vier identifizierten Kategorien, in denen Schwachstellen auftraten, sind *didaktischer Aufbau*, *Visualisierung*, *inhaltliche Struktur* und *praktische Modellbildung*. Zur weiteren Untersuchung der *inhaltlichen Struktur* wird die Bloom'sche Taxonomie (Bloom 1956) verwendet. Sie wird genutzt, um Schwierigkeitsgrade der Elemente der initialen Schulung zu identifizieren und die initial definierten Lernziele und Inhalte zu prüfen. Dadurch können Lücken und Sprünge im Schwierigkeitsgrad erkannt werden, welche zu einer Überforderung der TeilnehmerInnen führen können.

Optimierung: In der anschließenden Optimierung werden Erkenntnisse aus der Bildungsforschung identifiziert, mit welchen die in der Situationsanalyse identifizierten Schwachstellen in den vier Kategorien adressiert werden können. Als Basis wird hier die Meta-Analyse nach Hattie (2010) genutzt, in welcher 138 Einflussgrößen auf den Lernerfolg zusammengeführt und nach ihrer Effektstärke bewertet wurden.

Anschließend werden Umsetzungsvorschläge zu den ermittelten Erkenntnissen der Bildungsforschung erarbeitet. Falls vorhanden, werden Effektstärken nach Hattie (2010) in der Umsetzung berücksichtigt, indem der Fokus auf Umsetzungsvorschläge mit größerer Effektstärke gelegt wird. Eine subjektive Priorisierung der Umsetzungsvorschläge findet ebenfalls statt. Sie orientiert sich am geschätzten Aufwand und der durch den Umsetzungsvorschlag eingebrachte Veränderung der Schulung. Diese Priorisierung soll eine effiziente Optimierung ermöglichen, da beispielsweise der Feinschliff einer Folie nicht notwendig ist, wenn sie durch eine strukturelle Änderung anschließend nicht übernommen wird. Zunächst werden die mit Priorität 1 versehenen Anpassungen durchgeführt, zuletzt die mit Priorität 4. Beispielsweise wird die Anpassung der Zielstellung in der praktischen Modellbildung als 1 priorisiert, da sie den gesamten Ablauf der Schulung beeinflusst. Eine Veränderung der Textgröße ist hingegen ein weniger gravierender Eingriff in den Ablauf der initialen Schulung und erhält die Priorität 4.

Die umfangreichste Änderung der initialen Schulung ist die Ableitung von Varianten, um in kontextspezifischen Schulungen geeignete Lernziele für verschiedene Zielgruppen anbieten zu können. Hierbei werden ausgehend von der didaktischen Analyse mit der Bloom'schen Taxonomie drei Varianten abgeleitet, die verschiedene kognitive Niveaustufen umfassen und zu unterschiedlichen Zielen genutzt werden können. Die Anwendungsschulung bildet dabei die Basisvariante und wird als Nach-

folgerin der initialen Schulung aus der Konzeptionierung entwickelt. Aus der Anwendungsschulung wird eine reduzierte Grundlagenschulung abgeleitet, die das Ziel hat, erste Kenntnisse zum C&C²-Ansatz zu vermitteln. Eine erweiterte Syntheseschulung mit dem Ziel der eigenständigen Nutzung des C&C²-Ansatzes zur Synthese von Lösungen für Gestaltungsprobleme im Berufsalltag der TeilnehmerInnen wird ebenfalls abgeleitet.

Evaluation: In der Evaluation wird die Anwendungsschulung als Basisvariante von EnhanCE Modelling am IPEK - Institut für Produktentwicklung als Weiterbildungsmaßnahme mit 20 wissenschaftlichen MitarbeiterInnen durchgeführt. Die TeilnehmerInnen hatten 0 bis 5 Jahre Erfahrung in der Konstruktion und kannten den C&C²-Ansatz größtenteils bereits aus ihren Vorlesungen ihres Studiums.

Die Inhalte der Anwendungsschulung werden aufgeteilt in die Kategorien der Schwierigkeiten aus der Systemanalyse evaluiert. Hierzu werden Fragen zu den Elementen der Kategorien gestellt und über eine fünfstufige Likert-Skala bewertet. Zudem werden auch in dieser Evaluation Freitextfragen gestellt, aus denen qualitative Aussagen für zukünftige Verbesserungen abgeleitet werden können.

5.2 Ergebnisse – Konzeptionierung

Die Vermittlung der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz basiert im EnhanCE Modelling schwerpunktmäßig auf den Abschnitten mit eigenständig durchzuführender Modellbildung (nach dem Konfuzius zugeschriebenen Zitat „*Sage es mir und ich werde es vergessen... zeige es mir und ich werde es vielleicht behalten... lass es mich tun und ich werde es können*“). Ziel der Methodenschulung für die TeilnehmerInnen ist dabei, die vermittelte Modellbildung verstanden zu haben und auch anwenden zu können. Die Anwendung bildet dabei zugleich die Basis für die Erforschung der Modellbildung, da nur erforscht werden kann, was auch angewandt wird.

Diese Abschnitte mit eigenständige Modellbildung bieten zugleich für Methodenforscher die Möglichkeit, die dabei entstehenden Daten zu nutzen, um Erkenntnisse zur Modellbildung zu gewinnen. Auf dieser Basis können in weiterführende Forschungsaktivitäten belastbare Daten zu der im EnhanCE Modelling vermittelten Modellbildung erzeugt werden (vgl. auch Kapitel 5.8 und 6). In Abbildung 5-2 ist der konzeptionelle Aufbau der Methodenschulung EnhanCE Modelling dargestellt.

Konzept der Methodenschulung EnhanceCE Modelling

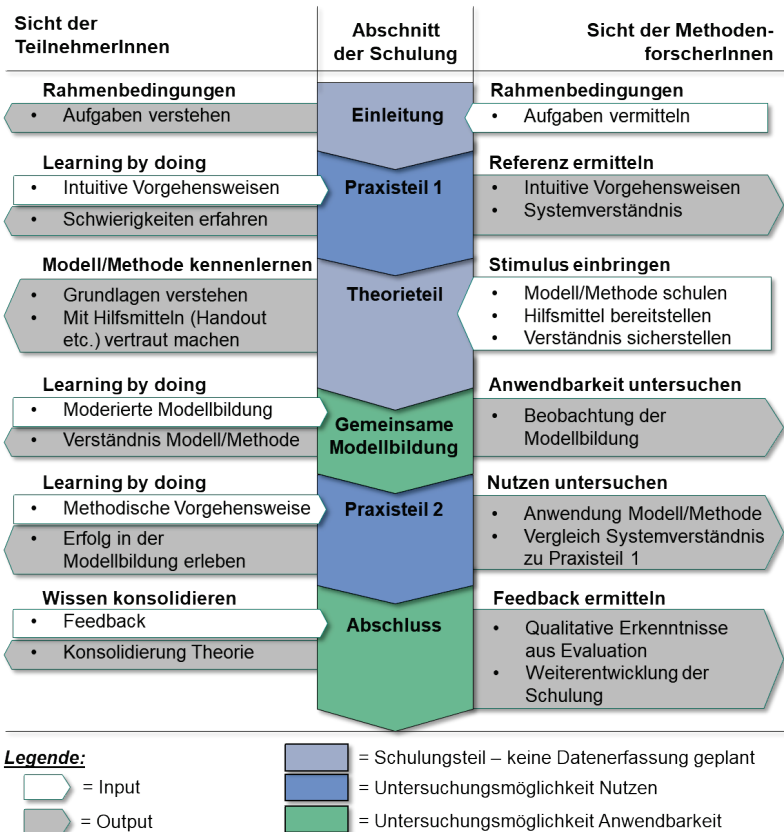








Abbildung 5-2: Konzeptioneller Aufbau der Methodenschulung EnhanceCE Modelling mit den Sichten der TeilnehmerInnen und MethodenforscherInnen, jedoch noch ohne spezifische Schulungsinhalte

Zentral sind die Abschnitte der Schulung in ihrem Ablauf dargestellt. Die Schulungsteile ohne Datenerfassungsmöglichkeiten sind in Blaugrau dargestellt. Blau kennzeichnet die Praxisteile, in denen eigenständige Modellbildung stattfindet und in denen der Nutzen der Modellbildung untersucht werden kann. In Grün sind interaktive Teile dargestellt, in denen die Anwendbarkeit untersucht werden kann. Auf dieser Basis wird die *initiale Schulung* zur Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz konzipiert.

Die konzeptionierte *initiale Schulung* wird auf Basis des C&C²-Ansatzes durch überarbeitete Definitionen, Vorträge und Diskussionen während der Erstellung des Kapitels „Gestaltung – Prozess und Methoden“ in der 9. Auflage des Pahl/Beitz (Matthiesen 2021) entwickelt. Expertenwissen wird durch die Analyse von Publikationen und wissenschaftlichen Austausch mit Entwicklern des C&C²-Ansatzes einbezogen. Aus den am IPEK – Institut für Produktentwicklung vorhandenen technischen Systemen werden Beispiele für die praktischen Teile der *initialen Schulung* aufgearbeitet. Das Constructive Alignment (vgl. Kapitel 2.6.1) wird genutzt, um Lernziele zu definieren, die durch die Schulung erreicht werden sollen. Diese Lernziele sind in Abbildung 5-3 mittig beschrieben. Die *initiale Schulung* beinhaltet einen Theorieteil, in dem Wissen zum C&C²-Ansatz und zur Modellbildungsmethode vermittelt wird, sowie drei Praxisteile, in denen Systemverständnis an Beispielen aufgebaut werden soll. Sie ist in Abbildung 5-3 im Überblick dargestellt.

Initiale Schulung zum C&C²-Ansatz

		Abschnitt und Inhalt	Lernziel	Impressionen
Gesamtdauer: 180 Minuten	Einleitung	<ul style="list-style-type: none"> • Ziel der Schulung • Vorstellung der Agenda 		
	Praxisteil 1	<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung der Aufgabenstellung • Konstruktion in Einzel- oder Kleingruppenarbeit • Fertigung und Test 	Herausforderung der Modellbildung von GFZ selbst erleben	
	Theorieteil	<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung C&C²-A an einem Unternehmensbeispiel • Vorstellung aktuelle Modellbildungsprojekte 	Inhalte und Anwendungsgebiete des C&C ² -A kennen	
	Gemeinsame Modellbildung	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung des C&C²-A nach Handout • Modellbildung in Einzelarbeit 	Modellbildung mit dem C&C ² -A durchführen können	
	Praxisteil 2	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung des C&C²-Ansatz in der Konstruktion • Bearbeitung der Aufgabe aus Praxisteil 1 	Herausforderung aus Praxisteil 1 durch Modellbildung mit dem C&C ² -A lösen können	
	Abschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenfassung des C&C²-A • Summative Evaluation 		

Legende:

- = Schulungsteil, keine Untersuchungsmöglichkeit eingeplant
- = Untersuchungsmöglichkeit Nutzen
- = Untersuchungsmöglichkeit Anwendbarkeit
- GFZ = Gestalt-Funktion-Zusammenhang
- C&C²-A = C&C²-Ansatz

Abbildung 5-3: Aufbau der initialen Schulung zum C&C²-Ansatz auf Basis des Konzepts des Enhance Modelling übersetzt nach (Grauberger et al. 2021)

Zu Beginn der initialen Schulung wird eine Einleitung und Übersicht gegeben. Anschließend beginnt ein Praxisteil, in dem intuitive Modellbildung von GFZ notwendig ist, um die Aufgabenstellen zu lösen. Details der Aufgabe werden im nächsten Kapitel (5.2.1) in der Systemvorstellung beschrieben. Lernziel ist hier, die Herausforderung in der Modellbildung von GFZ selbst zu erleben. Dies soll die Motivation zum

Erlernen des C&C²-Ansatzes steigern. Zudem besteht hier die Möglichkeit zur Untersuchung des Nutzens des C&C²-Ansatzes, indem die intuitive Modellbildung als „Kontrollgruppe“ erfasst wird.

Im Theorieteil wird der C&C²-Ansatz am Beispiel eines Entwicklungsprojekts aus dem Unternehmensumfeld vorgestellt und anschließend seine Anwendung in aktuellen Fragestellungen der Forschung vorgestellt. Hierbei liegt der Fokus darauf, ausgehend vom realen Entwicklungsproblem die Lösung nachzuvollziehen. Das Lernziel besteht darin, Inhalte und Anwendungsgebiete des C&C²-Ansatzes zu kennen. Hier werden wie in der Einleitung keine Untersuchungsmöglichkeiten eingepplant.

In der anschließenden gemeinsamen Modellbildung werden die Schritte der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes moderiert durchgeführt, um den Umgang mit dem C&C²-Ansatz zu erlernen. Das Lernziel ist hier, eigenständig eine Modellbildung durchführen zu können. Hierbei lassen sich die einzelnen Schritte der Modellbildung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit durch die TeilnehmerInnen untersuchen, da zu jedem Schritt Dokumente entstehen, welche ausgewertet werden können.

Im zweiten Praxisteil soll mit der gelernten Modellbildung auf Basis des C&C²-Ansatz die Aufgabe des ersten Praxisteils gelöst werden. Für den Fall, dass die Aufgabe durch TeilnehmerInnen bereits gelöst wurde, wird eine zweite Schwierigkeitsstufe entwickelt. Eine Lernkontrolle erfolgt durch die messbaren Ergebnisse zur Funktionserfüllung der Systeme im zweiten Praxisteil. Diese Lernkontrolle ist am beruflichen Umfeld der TeilnehmerInnen orientiert, da sie einen Meilenstein darstellt, an welchem die geforderte Funktion erfüllt werden muss. Zudem besteht hier die Möglichkeit zur Untersuchung des Nutzens des C&C²-Ansatzes, indem Einflüsse der Modellbildung auf das Systemverständnis erfasst und mit der intuitiven Vorgehensweise verglichen werden.

Zum Abschluss wird der C&C²-Ansatz zusammengefasst und eine summative Evaluation durchgeführt. Im Rahmen der Evaluation besteht ebenfalls die Möglichkeit, qualitative Daten zur Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes zu erfassen.

Die in den Praxisteilen genutzten Systeme werden im Folgenden kurz beschrieben.

5.2.1 Systeme in den Praxisteilen der Modellbildung

Ziel des ersten Praxisteils ist es, das Erleben von Modellbildungsschwierigkeiten an selbst entwickelten, technischen Systemen zu ermöglichen.

Dazu werden Systeme benötigt, welche einerseits im Rahmen der Schulung handhabbar sind (wenige Komponenten, mit 2D-Rapid Prototyping in wenigen Minuten herstellbar), und andererseits ein relativ kompliziertes Systemverhalten zeigen, welche das Verständnis der funktionsrelevanten Gestaltparameter herausfordert. Dadurch kann qualitatives und auch quantitatives Systemverhalten für die TeilnehmerInnen erlebbar werden.

Ein geeignetes System für diese Anforderungen ist beispielsweise eine Rasthakenverbindung. Rasthakenverbindungen ermöglichen allgemein das zerstörungsfreie Lösen einer Bauteilverbindung unter bestimmter Kraft, beispielsweise als Sicherungsverchluss an Schlüsselanhängerbändern (vgl. auch Abbildung 5-4). Sie sind nicht genormt und das Verständnis ihrer GFZ im Detail ist auch für erfahrene ProduktentwicklerInnen häufig herausfordernd.¹

In den Praxisteilen ist die Aufgabe, eine Rasthakenverbindung aus hochdichter Faserplatte (HDF) zu entwerfen, die eine Haltekraft von 100N erreicht. Anschließend muss die Verbindung nochmals 10N halten können, um sicherzugehen, dass der Rasthaken während des ersten Tests nicht vollständig zerstört wurde. Der entworfene Rasthaken wird an einem Lasercutter gefertigt. Die Gegenstücke der Rasthakenverbindung sowie der notwendige Prüfaufbau zur Ermittlung der Haltekräfte werden in der Vorbereitung der Schulung ebenfalls am Lasercutter gefertigt. Dies bietet den Vorteil, dass die Schulung schnell an wechselnde Teilnehmerzahlen angepasst werden kann. Sie dürfen durch die TeilnehmerInnen konstruktiv nicht verändert werden, wodurch der Lösungsraum eingeschränkt wird. Ein Beispiel für eine Rasthakenverbindung ist in Abbildung 5-4 links dargestellt.

In den Praxisteilen sind zunächst 2 Computer mit CAD-Software (PTC Creo 5.0) und jeweils ein CAD-Experte zur Modellierung der Ideen der Teilnehmer vorhanden. Die modellierten Ideen werden dann auf zwei Trotec® Lasercuttern gefertigt. Nach der Fertigung werden die gefertigten Teile in den Prüfaufbau eingelegt und getestet. Eine Montagevorrichtung unterstützt den Zusammenbau der Teile. Mit einer elektronischen Kofferwaage wird die maximale Haltekraft der Rasthakenverbindung ermittelt.

Für den Fall, dass die Aufgabenstellung zur Rasthakenverbindung bereits vor dem Erreichen des zweiten Praxisteils (mit Anwendung der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes) erfolgreich bearbeitet wurde, wird als zweite Stufe die Entwicklung einer Rasthakenverbindung gefordert, welche 5x über 100N Haltekraft erreicht.

¹ Erfahrung des Autors dieser Forschungsarbeit aus zwei vorhergehenden Methodenschulungsworkshops mit Unternehmensbeteiligung.

Diese Aufgabenstellung erfordert ein vertieftes Verständnis der GFZ, da hier eine verschleißarme Kombination an funktionsrelevanten Gestaltparametern gefunden werden muss.

Für die praktischen Teile wird als Backup-System der Vorschubmechanismus einer Kartuschenpresse aufbereitet. Dieses System zeigt ähnliche GFZ wie die Rasthakenverbindung und bietet ebenfalls die Möglichkeit, kompliziertes Systemverhalten mit einfachen Prototypen erlebbar zu machen. Es kann eingesetzt werden, falls TeilnehmerInnen mit den funktionsrelevanten Gestaltparametern einer Rasthakenverbindung vertraut sind (beispielsweise, weil sie diese in ihrem beruflichen Alltag auslegen). Es wird zunächst nicht genutzt, dient jedoch in der Validierungsstudie (Kapitel 6) als Grundlage der Aufgabenstellung des Experiments. Ein Beispiel für den Vorschubmechanismus der Kartuschenpresse ist in Abbildung 5-4 rechts dargestellt.

Im Abschnitt der gemeinsamen Modellbildung wird eine Keilsicherungsscheibe als System genutzt. Keilsicherungsscheiben beinhalten mehrere herausfordernde GFZ, besitzen als System aber eine geringe Kompliziertheit (durch wenige Teile) und können deshalb in einem überschaubaren Zeitrahmen modelliert werden. Ein Beispiel für eine Keilsicherungsscheibe ist in Abbildung 5-4 mittig dargestellt.



Abbildung 5-4: Für die Schulung aufbereitete technische Systeme mit Piktogramm der Abschnitte des EnhanCE Modelling, in denen sie genutzt werden. Links eine Rasthakenverbindung, mittig eine Keilsicherungsscheibe, rechts der Vorschubmechanismus einer Kartuschenpresse.

5.3 Ergebnisse – Situationsanalyse

Die initiale Schulung wird mit drei Teilnehmergruppen durchgeführt. Die daran anschließende Situationsanalyse beinhaltet zwei Teile. Zum einen wird die Schulung evaluiert, um mögliche Schwachstellen identifizieren und beheben zu können. Zum anderen wird eine Analyse der didaktischen Elemente als Basis für den zielgerichteten Einsatz von Elementen und Erkenntnissen der Bildungsforschung durchgeführt.

5.3.1 Schwachstellen aus der Freitextfrage der Evaluation

Im ersten Schritt der *Situationsanalyse* wird zunächst die in der Anwendung des Schulungskonzepts gestellte Freitextfrage "Was könnte verbessert werden?" ausgewertet. Abbildung 5-5 zeigt die 14 Antworten auf die Freitextfrage welche Schwachstellen aufzeigten, eingeteilt in die vier Kategorien didaktischer Aufbau, Visualisierung, inhaltliche Struktur und praktische Modellbildung.



Abbildung 5-5: Kategorisierte qualitative Schwachstellen aus den Antworten der Freitextfrage in der Evaluation der initialen Schulung (Grauberger et al. 2021)

5.3.2 Analyse der inhaltlichen Struktur

Die Bloom'sche Taxonomie wird verwendet, um einen Überblick über die inhaltliche Struktur hinsichtlich ihrer kognitiven Herausforderung zu gewinnen (siehe auch Kapitel 2.6). Die in der initialen Schulung vermittelten Elemente des C&C²-Ansatzes werden analysiert und kognitive Niveaustufen gemäß den Beschreibungen in Kapitel 2.6 zugeordnet. Diese Bewertung ist in Abbildung 5-6 dargestellt.

Inhalt der initialen Schulung des EnhanCE Modelling		Kognitive Niveaustufen nach Bloom (1956)					
		Wissen	Verständnis	Anwendung	Analyse	Synthese	Beurteilung
Kern- elemente	WFP	Blau			Blau		
	LSS						
	C						
Parameter							
C&C ² -Sequenzmodell							
Grundhypothesen							
Modellzweck		In der initialen Schulung adressiert					
Systemgrenzen							
Visualisierung							
Analyse- techniken	Zoom						
	Shift				Blau		
	Perspektiven- wechsel	Nicht adressiert					
Synthese- prinzipien	KE hinzufügen						
	KE entfernen						
	KE ändern					Blau	

Legende: WFP = Wirkflächenpaar C = Connector
LSS = Leitstützstruktur KE = Kernelement

Abbildung 5-6: Einordnung der Elemente der initialen Schulung in die Bloom'sche Taxonomie (Grauberger et al. 2021)

In Abbildung 5-6 sind in der linken Spalte die in der Schulung enthaltenen Bestandteile des C&C²-Ansatzes aufgeführt. Die sechs rechten Spalten sind als die verschiedenen kognitiven Niveaustufen nach der Bloom'schen Taxonomie definiert. Adressierte Elemente sind blau, nicht adressierte Elemente braun markiert.

5.4 Ergebnisse – Optimierung

In der *Optimierung* werden auf der Grundlage der Situationsanalyse zunächst Lösungen aus der Bildungsforschung den in Abbildung 5-5 beschriebenen Schwachstellen in den vier Themenbereichen didaktischer Aufbau, Visualisierung, inhaltliche Struktur und praktische Modellierung zugeordnet. Zudem wird eine subjektive Priorisierung durchgeführt, nach welcher die Lösungen umgesetzt werden sollen. Die Zuordnungen, Lösungen und Priorisierungen finden sich in den folgenden Tabellen 4 – 7.

Die Schwachstellen und korrespondierenden Lösungen zum didaktischen Aufbau sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Hier werden sowohl Schwachstellen als auch ausgearbeitete Lösungen beschrieben. Zudem wird, falls vorhanden, die Effektstärke der Lösung aus der Hattie-Studie angegeben. Die Priorisierung der Kleingruppenarbeit und Gruppendiskussion wird mit 2 als relativ hoch eingestuft, da beides größere Änderungen im Schulungsablauf erfordert und deshalb frühzeitig in der Optimierung adressiert werden sollte.

Tabelle 5-1: Aufgedeckte Schwachstellen zum didaktischen Aufbau aus der Freitextfrage der Evaluation des Schulungskonzepts und gewählte Lösungen

Schwachstelle	Erkenntnisse der Bildungsforschung		Umsetzung der Lösung	
	Lösung	E	Implementierung in die Schulung	P
Hauptsächlich Einzelarbeit.	Kleingruppenarbeit	0,49	Die Teilnehmer werden in Zweiergruppen eingeteilt. Sie teilen sich einen Tisch und die Beispielsysteme.	2
Geringe Interaktion im Theorieteil.	Gruppendiskussion	0,82	Diskussionsteile mit Karten und einer Pinnwand wurden integriert.	2
	Fragen stellen	-	Nach jedem Abschnitt der Schulung wird zum Fragen stellen motiviert.	3
Feedback erst am Ende des Kurses.	Feedback nach jedem Abschnitt.	0,75	Feedback wird nach jeder Fragestellung eingeholt.	3
Legende: E = Effekt nach Hattie (2010) P = Priorisierung (1 = hoch, 4 = niedrig)				

In Tabelle 5-2 sind Schwachstellen und korrespondierende Lösungen zur Kategorie Visualisierung beschrieben. Hierzu sind keine Effekte der Hattie-Studie vorhanden und die Priorität der Umsetzung wird als relativ niedrig betrachtet, da hier hauptsächlich eine Reduktion in der Präsentation der Inhalte notwendig ist, welche wenig in den Ablauf der Schulung eingreift.

Tabelle 5-2: Aufgedeckte Schwachstellen der Visualisierung aus der Freitextfrage der Evaluation des Schulungskonzepts und gewählte Lösungen

Schwachstelle	Erkenntnisse der Bildungsforschung	Umsetzung der Lösung	
		Implementierung in die Schulung	P
Evaluation der Schulung	Lösung		
Zu viel Text	Stichwörter statt Sätze.	Folien mit mehr als einem Satz an Text werden überarbeitet.	4
Verwirrende Inhalte	Inhaltliche Konsistenz auf der Folie.	Unnötiger Inhalt wird identifiziert, indem die Kernaussage der Folie (im Titel) mit vorhandenen Elementen verglichen wird.	3
Zu viele Grafiken	Irrelevante Elemente weglassen.	Komplexe Graphen, die vor allem bei der Beschreibung von Forschungsprojekten vorkommen, werden entfernt oder vereinfacht.	3
Ablenkende Grafiken			
Zu kleiner Text und Grafiken	Schrift- und Grafikgröße anpassen	Die Schrift- und Diagrammgröße wird erhöht, um den durch das Entfernen von Elementen gewonnenen Platz zu nutzen.	4
Legende: P = Priorisierung (1 = hoch, 4 = niedrig)			

Tabelle 5-3 zeigt Schwachstellen und Lösungen zur inhaltlichen Struktur. Diese Maßnahmen werden relativ hoch priorisiert, da die Zusammenfassung der Inhalte auf einem Handout und ihre Erläuterung im Theorieteil dessen Struktur verändert. In der initialen Schulung wurde der Fokus daraufgelegt, einen breiten Überblick über Anwendungen des C&C²-Ansatzes zu geben und die Modellbildung an Beispielen zu erläutern. Die Umstrukturierung erfordert eine Auswahl und vertiefte Ausarbeitung eines Beispiels, in dem die Modellbildung detailliert besprochen wird.

Tabelle 5-3: Aufgedeckte Schwachstellen der inhaltlichen Struktur aus der Freitextfrage der Evaluation des Schulungskonzepts und gewählte Lösungen

Schwachstelle	Erkenntnisse der Bildungsforschung	Umsetzung der Lösung	
Evaluation der Schulung	Lösung	Implementierung in die Schulung	P
Schwierigkeit mit verschiedenen Elementen des C&C ² -Ansatzes.	Handout zur Theorie und praktischen Modellbildung.	Es wird ein Handout entworfen, das zwei Seiten enthält. Die eine zeigt die Übersicht über den C&C ² -Ansatz, die andere enthält Erläuterungen zu den Schritten der Modellbildungsmethoden.	2
Lücken zwischen Elementen			
Fehlende Unterstützung in der Modellbildung			
Verwirrung durch viele Beispiele in kurzer Zeit	Unnötige Beispiele weglassen.	Komplexe Forschungsprojekte werden im Rahmen der Schulung nicht vorgestellt. Von den fünf Beispielen bleibt nur eins im Theorieteil.	2

Legende: P = Priorisierung (1 = hoch, 4 = niedrig)

In Tabelle 5-4 wird die zentrale Schwachstelle der praktischen Modellbildung beschrieben. Sie hat die höchste Priorität der in der Analyse der Freitextfrage aufgedeckten Schwachstellen, da die praktischen Teile einen großen Einfluss auf die erfolgreiche Vermittlung der Modellbildung und auch die Untersuchung der Erfolgsfaktoren Anwendbarkeit und Nutzen haben.

Tabelle 5-4: Aufgedeckte Schwachstelle der praktischen Modellbildung aus der Freitextfrage der Evaluation des Schulungskonzepts und gewählte Lösungen

Schwachstelle	Erkenntnisse der Bildungsforschung		Umsetzung der Lösung	
	Lösung	E	Implementierung der Lösung in die Schulung	P
Unklares Ziel der praktischen Aufgaben.	Interaktive Aufgaben	0,50	Fragen und Gruppendiskussionen sind auch in den praktischen Teilen erwünscht. Das Ziel der praktischen Aufgaben wird auf einem Flipchart sowie auf den an die Teilnehmer ausgegebenen Blättern festgehalten.	1
Legende: E = Effekt nach Hattie (2010) P = Priorisierung (1 = hoch, 4 = niedrig)				

5.5 Ableitung von Schulungsvarianten zur Kontextanpassung des EnhanCE Modelling

Die initiale Schulung weist Lücken bezüglich der durch sie adressierten kognitiven Niveaustufen auf. Eine systematische Ableitung von Varianten bietet den Vorteil, dass vorhandene Lücken in den kognitiven Niveaustufen geschlossen werden können, ohne den Kontext der Vermittlung des C&C²-Ansatzes einschränken zu müssen. Der C&C²-Ansatz kann so im EnhanCE Modelling entsprechend den Bedürfnissen der jeweiligen Zielgruppe angepasst vermittelt werden. Hierfür werden zunächst die zu adressierenden Lernziele verfeinert und Zielgruppen / Einsatzgebiete der Varianten definiert. Es werden drei Varianten abgeleitet, um den Schulungsbedarf von Novizen bis zu Experten zu adressieren. Diese sind in Tabelle 5-5 beschrieben.

Tabelle 5-5: Übersicht der Schulungsvarianten des EnhanCE Modelling

Variante	Übergeordnete Lernziele	Zielgruppe / Einsatzgebiet	Forschungsmöglichkeiten	Dauer
Grundlagenschulung	Grundlagen zur Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz: Vermittlung des Basiswissens zum C&C ² -Ansatz und Befähigung zur Modellbildung in vorgegebenen Aufgabenstellungen.	TeilnehmerInnen von Studien zum C&C ² -Ansatz Erläuterung in Unternehmensprojekten	Experimentelle Untersuchungen durch kontrollierbare Randbedingungen und potentiell unbegrenzte Probandenzahlen	30 Minuten
Anwendungsschulung	Anwendung der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz: Vermittlung des Basiswissens zum C&C ² -Ansatz und Befähigung zur Modellbildung in der Analyse technischer Systeme.	Universitäre Lehre Kennenlernen des C&C ² -Ansatzes im Unternehmensumfeld	Feldstudien durch große Probandengruppen (bis 30 Personen abhängig von Fertigungsressourcen) und umfangreiche Praxisteile	3 Stunden
Syntheseschulung	Zielgerichtet konstruieren mit dem C&C²-Ansatz: Umfassende Vermittlung des C&C ² -Ansatzes und Befähigung zu seiner eigenständigen Anwendung in Analyse und Synthesaufgaben des praktischen Arbeitsumfelds.	Weiterbildung im Unternehmensumfeld Ausbildung von Experten der Modellbildung	Fallstudien durch kleine Probandengruppen (<15 Personen) und Praxisteile aus dem Unternehmensumfeld	3 Tage

Die *Grundlagenschulung* dient der Vermittlung der Grundlagen des C&C²-Ansatzes in einem kurzen Zeitraum. Übergeordnete Lernziele sind zum einen den groben Überblick über den C&C²-Ansatz zu vermitteln und zum anderen das Erlebnis eines Erkenntnisgewinns durch die Modellbildung an einem ersten geführten Beispiel zu ermöglichen. Ihr Umfang beträgt etwa 30 Minuten. An kognitiven Niveaustufen werden die Kernelemente sowie die Parameter und das C&C²-Sequenzmodell bis zur

Anwendung vermittelt (vgl. auch Abbildung 5-7 oben). Die Grundhypothesen, Systemgrenzen und Visualisierung werden in der geführten Modellbildung vorgestellt, jedoch aufgrund der geführten Modellbildung nicht eigenständig angewandt.

Die *Anwendungsschulung* bietet die Möglichkeit zur ersten eigenständigen Anwendung des C&C²-Ansatzes und entspricht von ihrem Umfang etwa der *initialen Schulung*. Sie erweitert die Lernziele der *Grundlagenschulung* dadurch, dass die Kernelemente, Parameter und das C&C²-Sequenzmodell eigenständig in den Analysen des zweiten praktischen Teils genutzt werden sollen (vgl. auch Abbildung 5-7 mittig). Hierbei werden durch die eigenständige Modellbildung der TeilnehmerInnen auch die Grundhypothesen, der Modellzweck, Systemgrenzen und Visualisierung in einer höheren kognitiven Niveaustufe vermittelt. Die Analysetechniken werden bis zur kognitiven Niveaustufe der Anwendung vermittelt. Zusätzlich wird im ersten Praxis teil die Erfahrung der Herausforderung der Modellbildung von GFZ aus der initialen Schulung beibehalten.

Die *Syntheseschulung* dient der umfassenden Vermittlung des C&C²-Ansatzes. Lernziele sind hier, die Elemente des C&C²-Ansatzes eigenständig zur Modellbildung in Herausforderungen des Unternehmensalltags nutzen zu können. Dazu wird auch vermittelt, welche Syntheseprinzipien zur Ableitung von geeigneten Lösungen für die Herausforderungen geeignet sind. Zudem werden weitere Methoden geschult, welche an die Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz anschließen können. Beispielsweise wird die Design-ACH zur Hypothesenstrukturierung (Nelius und Matthiesen 2019) oder der Problemlösungsprozess SPALTEN (Albers et al. 2016c) geschult. Abbildung 5-7 zeigt eine Übersicht über die Inhalte und angesprochenen kognitiven Niveaustufen der drei Varianten der Schulung.

Inhalte der Schulungsvarianten des EnhanCE Modelling		Kognitive Niveaustufen nach Bloom (1956)					
		Wissen	Verständnis	Anwendung	Analyse	Synthese	Beurteilung
Kern-elemente	WFP	Grundlagen-schulung					
	LSS						
	C						
Parameter							
C&C ² -Sequenzmodell							
Grundhypothesen							
Modellzweck		Anwendungs-schulung					
Systemgrenzen							
Visualisierung							
Analyse-techniken	Zoom						
	Shift						
	Perspektiven-wechsel				Synthese-schulung		
Synthese-prinzipien	KE hinzufügen						
	KE entfernen						
	KE ändern						

Legende: WFP = Wirkflächenpaar C = Connector
 LSS = Leitstützstruktur KE = Kernelement



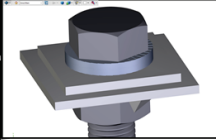
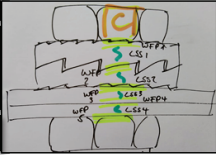
Abbildung 5-7: Vermittlung von Inhalten in den Varianten des EnhanCE Modelling eingeordnet in die Bloom'sche Taxonomie (Grauberger et al. 2021)

Im Folgenden werden die Inhalte der Schulungsvarianten des EnhanCE Modelling im Detail beschrieben.

5.5.1 Die Grundlagenschulung

Ziel der Grundlagenschulung ist die Vermittlung des Basiswissens zum C&C²-Ansatz und Befähigung zur Modellbildung in vorgegebenen Aufgabenstellungen. Sie bietet für MethodenforscherInnen die größte Flexibilität, da sie als reine Online-Schulung durchgeführt werden kann, wodurch die Anzahl der Probanden durch keine physischen Randbedingungen beschränkt wird. Für die Durchführung experimenteller Studien bietet sie den Vorteil der hohen Reproduzierbarkeit, da sie als Video-Schulung durchgeführt werden kann, in welcher der Einfluss des Moderators als Störgröße wegfällt. Sie ist in einer Übersicht in Abbildung 5-8 dargestellt.

EnhanCE Modelling: Grundlagenschulung zum C&C²-Ansatz

	Abschnitt und Inhalt	Lernziel	Impressionen
30 Minuten ohne Studienblöcke	Einleitung <ul style="list-style-type: none"> • Ziel der Schulung in einem Satz • Übergabe des Handouts 		
	Studienblock 1 – beliebige Inhalte bei Bedarf		
	<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung der Kernelemente an einem sehr einfachen Beispiel • Vorstellung der Modellbildungsmethode für den C&C²-Ansatz 	Kernelemente und C&C ² -Sequenzmodell kennen Modellbildungsmethode kennen Handout-Inhalte kennen	
	Modellbildung nach Handout <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung des C&C²-Ansatzes nach der Modellbildungsmethode • Modellbildung in Einzelarbeit 	Schritte der Modellbildung mit Handout ausführen können	
	Abschluss <ul style="list-style-type: none"> • Abfrage zur Verständlichkeit der Schulung 		
	Studienblock 2 – beliebige Inhalte bei Bedarf		

Legende:

- = Schulungsteil, keine Untersuchungsmöglichkeit eingeplant
- = Untersuchungsmöglichkeit Nutzen
- = Untersuchungsmöglichkeit Anwendbarkeit

Abbildung 5-8: Übersicht der Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling mit Lernzielen und Impressionen der Modellbildung

In der Grundlagenschulung sind die Praxisteile der initialen Schulung nicht enthalten. Dadurch fehlt zwar das Erlebnis der Notwendigkeit des Verständnisses von GFZ und Übungsmöglichkeiten zur Modellbildung. Jedoch wird es möglich, im Studienblock 1 beliebige Aufgabenstellungen zu integrieren. Beispielsweise kann das intuitive Systemverständnis geprüft werden, oder es wird eine andere Modellbildungsmethode als Referenz genutzt.

Die Grundlagenschulung stützt sich im Theorieteil stärker auf das Handout als die Anwendungs- und Syntheseschulung. In einem 6-Minuten Video werden die Grundlagen des C&C²-Ansatzes erläutert (vergleiche auch Abbildung 5-7). Die Elemente

des C&C²-Ansatzes werden am Beispiel einer Person, die ein Paket trägt, beschrieben. Die Kernelemente und das C&C²-Sequenzmodell werden kurz erläutert. Anschließend wird durch die Schritte der Modellbildung an der Keilsicherungscheibe geleitet, indem jeder Schritt eigenständig erarbeitet werden muss und anschließend mit der Musterlösung verglichen werden kann. Zum Abschluss führt der Moderator den Übergang zum Studienblock 2 durch oder schließt die Schulung ab, falls sie nicht im Rahmen einer Studie eingesetzt wird.

5.5.2 Die Anwendungsschulung

Die Anwendungsschulung ist von ihrem Aufbau her ähnlich zu der in Kapitel 5.2 vorgestellten initialen Schulung. Sie vermittelt den TeilnehmerInnen eine erste Anwendung des C&C²-Ansatzes in den praktischen Modellbildungsteilen und ermöglicht dadurch ein tieferes Verständnis der Modellbildung als die Grundlagenschulung. Für Methodenforscher ist sie geeignet, um Feldstudien durchzuführen, in denen umfangreichere Aufgabenstellungen bearbeitet werden. Hier können vielseitige Datenerfassungsmöglichkeiten (beispielsweise durch Studienbeobachter, Dokumentanalyse oder Eye-Tracking) genutzt werden. Die Teilnehmeranzahl ist durch die Praxisteile abhängig von den vorhandenen Ressourcen auf ~30 TeilnehmerInnen beschränkt. Beschränkende Faktoren sind die Raumgröße, verfügbare Lasercutter (max. 5 Kleingruppen pro Lasercutter aufgrund der Wartezeiten) und notwendige Unterstützung in der Konstruktion (0,1 – 1 CAD-ExpertInnen pro TeilnehmerIn). Die Anwendungsschulung ist in Abbildung 5-9 im Überblick dargestellt.







EnhanCE Modellierung: Anwendungsschulung zum C&C²-Ansatz			
180 Minuten	Abschnitt und Inhalt	Adaptionen zur initialen Schulung	Lernziele Impressionen
180 Minuten	Einleitung • Ziel der Schulung • Vorstellung der Agenda	Optimierte Folien der begleitenden Präsentation	
	Praxisteil 1 • Vorstellung der Aufgabe • Gestaltung in der Kleingruppe • Fertigung und Test	Kleingruppenarbeit Feedback Interaktive Aufgaben	Herausforderung der Modellbildung von GFZ selbst erleben 
	Theoretischer Teil • Vorstellung des C&C ² -A mit zwei Beispielen • Vorstellung der Modellbildungsmethode für den C&C ² -A	Ein Beispiel, vereinfachte Beschreibung Handout	Inhalte des C&C ² -A kennen 
	Gemeinsame Modellbildung • Anwendung des C&C ² -A nach der Modellbildungsmethode • Modellbildung in Einzelarbeit • Präsentation und gemeinsame Diskussion der Musterlösung	Fragenstellen Gruppendiskussion Formative Evaluation Feedback	Modellbildung mit dem C&C ² -A verstehen und anwenden können 
	Praxisteil 2 • Nutzung des C&C ² -A in der Gestaltung • Weitere Bearbeitung der Aufgabe aus Praxisteil 1	Kleingruppenarbeit Abschluss-Feedback	Herausforderung aus Praxisteil 1 durch Modellbildung mit dem C&C ² -A lösen können 
	Abschluss • Zusammenfassung des C&C ² -A • Summative Evaluation		
Legende C&C ² -A = C&C ² -Ansatz GFZ = Gestalt-Funktion-Zusammenhang [Light Blue Box] = Schulungsteil, keine Untersuchungsmöglichkeit eingeplant [Blue Box] = Untersuchungsmöglichkeit Nutzen [Green Box] = Untersuchungsmöglichkeit Anwendbarkeit		Adaptionen: [Light Blue Box] = Visualisierung [Red Box] = Praktische Modellbildung [Yellow Box] = Inhaltliche Struktur [Green Box] = Didaktischer Aufbau	

Abbildung 5-9: Übersicht der Anwendungsschulung des EnhanCE Modellierung mit Änderungen zur initialen Schulung (Grauberger et al. 2021)

Die Änderungen der Anwendungsschulung zur initialen Schulung sowie die angepassten Lernziele (Abbildung 5-9 Mitte) werden im Folgenden kurz erläutert.

Im Praxisteil 1 wird die Arbeitsweise (vgl. auch Tabelle 5-3) und auch die Aufgabenstellung (vgl. auch Tabelle 5-4) angepasst. Das Lernziel wird nicht verändert.

Im theoretischen Teil werden Inhalte bezüglich der Anwendung des C&C²-Ansatzes in Aufgaben der Analyse und Synthese mit Analysetechniken und Syntheseprozessen entfernt. Diese sind zum Verständnis der Modellbildung nicht zwingend erforderlich und werden in der Regel für spezifische Problemstellungen genutzt, die erst für Modellbildungsexperten mit dem C&C²-Ansatz relevant werden. Die Lernziele im Theorieteil werden auf die Kenntnis der Kernelemente und der Modellbildungsmethode reduziert

Die gemeinsame Modellbildung wird durch die Integration von Frageteil, Gruppendiskussionspunkten, einer Feedback-Folie und einer formativen Evaluation² erweitert. Das Lernziel wird auf die eigenständige Modellbildung mit Hilfe des Handouts in der definierten Aufgabenstellung des zweiten praktischen Teils angepasst. Eine Lernkontrolle erfolgt hier durch die Besprechung der einzelnen Schritte der Modellbildung, nachdem sie von den TeilnehmerInnen eigenständig durchgeführt wurden.

Im zweiten praktischen Teil wird zusätzlich eine Kleingruppenarbeit und ein abschließendes Feedback eingefügt. Das Lernziel wird nicht angepasst. Die visuellen Elemente der Folien wurden in der gesamten begleitenden Präsentation angepasst.

5.5.3 Die Syntheseschulung

Das folgende Kapitel basiert auf den Publikationen (Nelius et al. 2021a) und (Nelius et al. 2021b). Teile des folgenden Texts sind ohne Veränderung aus der Veröffentlichung in deutscher Form übernommen. Sie wurde als Gemeinschaftsarbeit mit Herrn Matthias Eisenmann und Herrn Thomas Nelius entwickelt, wobei der Autor dieser Forschungsarbeit den Schwerpunkt der Modellbildung von GFZ entwickelte. Auf diesen fokussiert das folgende Kapitel.

Um eine umfassende Ausbildung von ExpertInnen im Umgang mit dem C&C²-Ansatz zu ermöglichen, wird die Anwendungsschulung erweitert. Dies ist notwendig, da eine zielführende eigenständige Anwendung des C&C²-Ansatzes zusätzliche

² Eine formative Evaluation dient der Erhebung eines Erfolgskriteriums während einer laufenden Lehreinheit und ermöglicht das Gegensteuern bei Abweichungen vom geplanten Fortschritt. Sie wird hier zusätzlich zur summativen Evaluation genutzt, da diese nur retrospektiv die Bewertung, aber kein Gegensteuern mehr ermöglicht.

Übung und auch weitere methodische Kenntnisse erfordert, die im Rahmen der Anwendungsschulung nicht vermittelt werden. Die Syntheseschulung beinhaltet zusätzliche Methoden und Prozesse, die über die reine Vermittlung des C&C²-Ansatzes hinausgehen.

Die Syntheseschulung ist als dreitägiger Workshop für ein Entwicklungsteam von 7 bis 15 Teilnehmer konzipiert. An den ersten zwei Tagen werden Methoden zur Problemanalyse vermittelt und an Anwendungsbeispielen eingeübt: Zur Modellbildung von GFZ wird der C&C²-Ansatz genutzt. Als übergeordnete Struktur dient die Problemlösungsmethode SPALTEN (Albers et al. 2016c). Zur Hypothesenprüfung kommt die Design Analysis of Competing Hypotheses - Design-ACH (Nelius und Matthiesen 2019) zum Einsatz.

In den Theorieeinheiten zu den Methoden wird den TeilnehmerInnen das Anwendungsfeld, die Anwendung und Randbedingungen der Methoden vermittelt. Anschließend werden die Methoden an realitätsnahen Aufgaben angewendet. Der Schulungsleiter stellt hierbei als Moderator eine korrekte Anwendung der Methoden sicher. Durch den Einsatz von Rapid-Prototyping können in den Praxisteilen Konstruktionsaufgaben gestellt werden, die von der Anforderungsanalyse über die Konstruktion und Fertigung bis zum Test der entwickelten Lösung reichen. Im Vergleich zur Anwendungsschulung steht jedoch deutlich mehr Zeit für den iterativen Erkenntnisgewinn zu GFZ zur Verfügung. Die Fertigung mit einem Lasercutter ermöglicht es, innerhalb von 2,5 Stunden 7-10 Iterationen durchzuführen, um auftretende Probleme in der Konstruktion zu identifizieren und zu beheben. Der Einsatz der Methoden wird nach der Anwendung unter Anleitung reflektiert, um etwaige Unklarheiten zu beseitigen und den Lernfortschritt zu festigen.

Um den Übertrag der Methodenanwendung in den Berufsalltag zur erleichtern, werden die Methoden an einem aktuellen Unternehmensproblem angewendet. In Abstimmung mit dem Unternehmen wird hierzu ein aktuelles technisches Problem aus der Entwicklung ausgewählt und zugehörige Informationen (Bauteile, Zeichnungen, Schadensberichte) zur Schulung aufbereitet. Unterstützt durch die Moderation des Schulungsleiters werden die vermittelten Methoden an dem unternehmenseigenen Problem angewendet.

Für Methodenforscher eignet sich die Syntheseschulung zur Durchführung von Fallstudien, da kleine Probandengruppen (<15 Personen) sehr umfangreiche Aufgaben bearbeiten, die teilweise direkt aus dem Unternehmensumfeld abgeleitet werden. Hierdurch hat diese Schulungsvariante die größte Praxisnähe und kann beispielsweise in der initialen Untersuchung neu entwickelter Modellbildungsmethoden ge-

nutzt werden. Aufgrund der geringen Probandenanzahl und dem Fokus auf Gruppenarbeit in den umfangreichen Aufgabenstellungen, sind nur qualitative Daten erhebbbar. Die Syntheseschulung ist als Übersicht in Abbildung 5-10 dargestellt.

EnhanCE Modelling: Syntheseschulung zum C&C²-Ansatz		
	Inhalte	Lernziele
Tag 1	Vormittags: Einleitung und Motivation <ul style="list-style-type: none"> • Ziel der Schulung und Vorstellung der Agenda • 90 Minuten Impulsvortrag zum C&C²-A und Beispiele 	Anwendungsgebiete des C&C ² -A kennen
	Nachmittags: Anwendungsschulung <ul style="list-style-type: none"> • Erweiterte Praxisteile durch 1h mehr Zeit • Theorieteil mit gemeinsamer Modellbildung • Zusammenfassung des Gelernten 	Lernziele der Anwendungsschulung
Tag 2	Der Problemlösungsprozess SPALTEN <ul style="list-style-type: none"> • Strukturiertes Vorgehen in der Konstruktion • Rahmen für den Einsatz von Modellbildung mit dem C&C²-A und der an ihn anschließenden Methoden 	SPALTEN kennen und geführt anwenden können
	Design ACH zur Hypothesenstrukturierung <ul style="list-style-type: none"> • Umgang mit Vermutungen und Indizien im Aufbau von Systemverständnis Kreativitätsmethoden zur Generierung von Lösungen <ul style="list-style-type: none"> • Brainstorming, 635, Galeriemethode (bei Bedarf erweiterbar) 	Aus der Modellbildung von GFZ Erkenntnisse ableiten und neue Produktideen generieren können
Tag 3	Anwendung der Methoden an Beispielen des Unternehmens <ul style="list-style-type: none"> • Aktuelles Beispiel einer Herausforderung im Unternehmen • Gemeinsame und moderierte Anwendung der vermittelten Modelle und Methoden 	Die vermittelten Modelle und Methoden in den Berufsalltag übertragen können
	Abschluss <ul style="list-style-type: none"> • Zusammenfassung der vermittelten Modelle und Methoden • Übergabe von Dokumenten 	Dokumentation in zukünftigen Fragestellungen nutzen können

Abbildung 5-10: Übersicht der Syntheseschulung mit eingebetteten Methoden und Anwendungsbeispielen aus dem akademischen Umfeld sowie der praktischen Anwendung in Herausforderungen von Unternehmen.

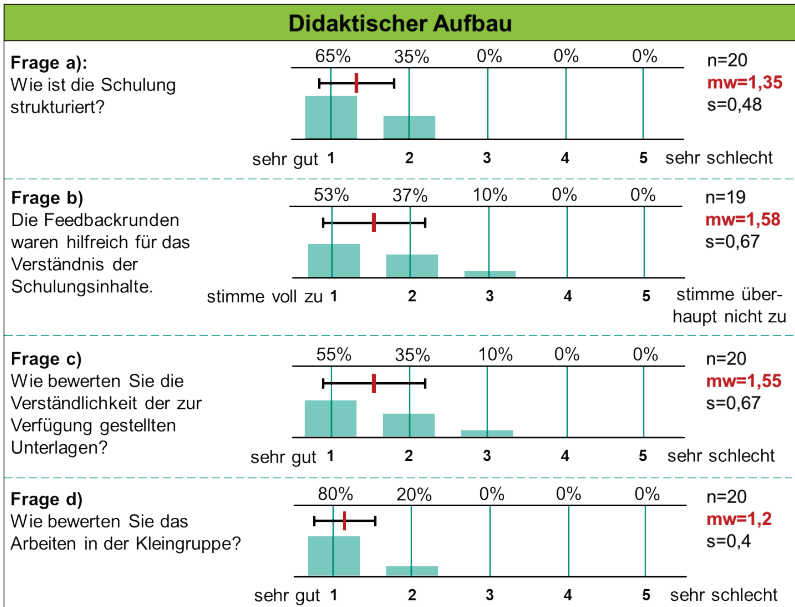
In der Syntheseschulung liegt der Fokus aktuell nicht auf der Untersuchung von Erfolgsfaktoren der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz, da ihr Vorteil in der Kombination mehrerer Methoden besteht, wodurch jedoch die Effekte der einzelnen Methoden vermischt werden. Sie wird als übergeordnete Schulung konzipiert, in die

Methoden nach Abschluss ihrer Entwicklung und Optimierung integriert werden können.

5.6 Ergebnisse – Evaluation der Anwendungsschulung

Die Anwendungsschulung wird mit 20 wissenschaftlichen MitarbeiterInnen des IPEK – Institut für Produktentwicklung durchgeführt. Die Maßnahmen der Optimierung werden hinsichtlich ihrer Wirkung auf die TeilnehmerInnen evaluiert. Die Anwendungsschulung wird detailliert betrachtet, da hier die implementierten Lösungen der Optimierung geprüft werden können. Die Syntheseschulung enthält die Anwendungsschulung und wird somit durch diese Evaluation mit abgedeckt. Die Grundlagenschulung enthält nur Teile der implementierten Lösungen, da die Praxisteile nicht durchgeführt werden. Ihre Evaluation ist daher für die Bewertung der umgesetzten Lösungen nicht notwendig.

Die Evaluationsfragen zum didaktischen Aufbau der Schulung sind in Abbildung 5-11 dargestellt. Die Fragen beziehen sich allgemein auf die Struktur, auf die Feedback-Runden, die Verständlichkeit der Unterlagen (Handout und Vorlagen zur Modellbildung in der gemeinsamen Modellbildung) und die Arbeit in Kleingruppen. Die abgefragten Aspekte des didaktischen Aufbaus werden von den TeilnehmerInnen als sehr gut und hilfreich bewertet.



Legende: n = Anzahl Teilnehmer mw = Mittelwert s = Standardabweichung

Abbildung 5-11: Evaluation des didaktischen Aufbaus der Anwendungsschulung zum C&C²-Ansatz (Grauberger et al. 2021)

Abbildung 5-12 zeigt eine positive Evaluation der Visualisierung der Folieninhalte. Die grafische Darstellung wird als übersichtlich und unterstützend für das Verständnis der Schulungsinhalte wahrgenommen.

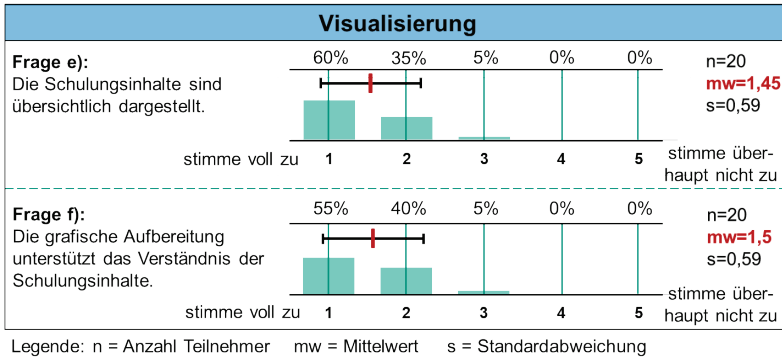
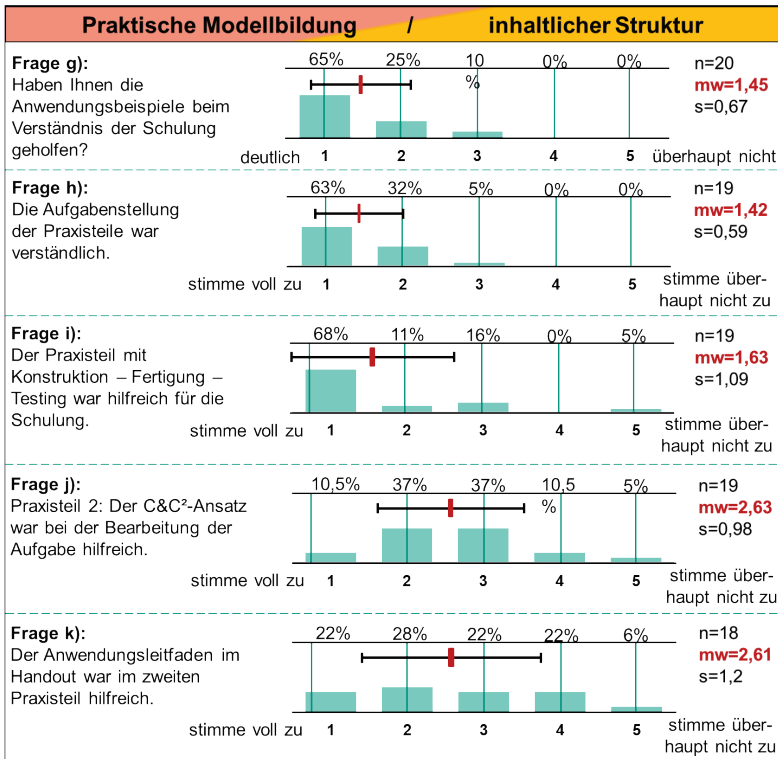


Abbildung 5-12: Evaluation der Visualisierung der Anwendungsschulung zum C&C²-Ansatz (Grauberger et al. 2021)

Die Bewertungsfragen aus dem Bereich der praktischen Modellierung sind in Abbildung 5-13 dargestellt. Die Teilnehmer empfinden die überarbeiteten Anwendungsbeispiele als deutliche Unterstützung für das Verständnis der Schulungsinhalte. Ebenso werden sowohl die Aufgaben der Praxisteile als auch der Aufbau der Praxisteile mit Konstruktion, Fertigung und Prüfung positiv bewertet.

Die Fragen j) und k) adressieren den zweiten Praxisteil. Hier zeigt sich eine Streuung der Bewertungen und befriedigende Ergebnisse. Der C&C²-Ansatz und das Handout werden nur als bedingt hilfreich für die Bewältigung der Aufgabe angesehen. Ein möglicher Grund für diese Bewertung zeigt sich den Ergebnissen der qualitativen Evaluationsfragen, die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.



Legende: n = Anzahl Teilnehmer mw = Mittelwert s = Standardabweichung

Abbildung 5-13: Evaluation der praktischen Modellbildung der Anwendungsschulung zum C&C²-Ansatz (Grauberger et al. 2021)

Die Antworten auf die im Freitextfragen-Abschnitt gestellten Fragen sind in Tabelle 5-6 aufgeführt:

Tabelle 5-6: Antworten auf die Freitextfragen der Evaluation der Anwendungsschulung zum C&C²-Ansatz

Frage	Antwort
Was hat Ihnen an der Schulung gefallen?	<ul style="list-style-type: none"> • Insgesamt sehr interessant • Direkte Validierung mit Lasercutter • Viele praktische Tätigkeiten / Anteile von Praxis und Theorie • Möglichkeit, eigene Ideen auszuprobieren • Keilsicherungsscheibe (gemeinsames Modellierbeispiel) • Arbeit in kleinen Gruppen
Was könnte verbessert werden?	<ul style="list-style-type: none"> • Zweiter Praxisteil war zu kurz / zu wenig Zeit • Wartezeit am Lasercutter • Workflow von CAD zur Fertigung / Engpass Prototyping • Beispiele, bei denen der C&C²-Ansatz zu verbesserten Produkten führte
In welchen Aktivitäten traten Schwierigkeiten oder Unklarheiten auf?	<ul style="list-style-type: none"> • Designraum in erster Aufgabe unklar • Vorgängergenerierung führt zu Konstruktionsfixierung • CAD-Modellierung • Iteratives vs. paralleles Vorgehen im ersten praktischen Teil • Abstraktionsgrad im gemeinsamen Modellierungsbeispiel • Learning by doing statt Berechnungen

Insbesondere die Bedienung der CAD-Software, mit der die Entwürfe der Rasthakenverbindung umgesetzt wurde, wurde häufig als Schwierigkeit genannt. Auch die Wartezeiten am Lasercutter wurden als Problem identifiziert. Im zweiten Praxisteil, in dem die Probanden den C&C²-Ansatz zur Lösung der gestellten Konstruktionsaufgabe anwenden konnten, wurde Zeitmangel als häufiges Problem genannt.

Zusammenfassend führte die Optimierung der initialen Schulung zu einer sehr positiv evaluierten Anwendungsschulung. Initiale Schwachstellen konnten durch die Anwendung von Erkenntnissen aus der Bildungsforschung identifiziert und teilweise beseitigt werden. Neue Schwachstellen wurden in der Evaluation identifiziert und können in zukünftigen Weiterentwicklungen der Anwendungsschulung berücksichtigt werden.

5.7 Zwischenfazit – Entwicklung des EnhanCE Modelling

Durch die Entwicklung des EnhanCE Modelling als Methodenschulung zur Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz wird die Basis zur Beantwortung der Forschungsfrage 2 *Wie kann die Modellbildung von GFZ auf Basis des C&C²-A methodisch unterstützt werden, um die zentrale Herausforderung der Anwendbarkeit zu überwinden?* gelegt.

Auf Basis des erstellten Konzepts des EnhanCE Modelling wurde zunächst eine initiale Schulung konzeptioniert, durch welche die Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz vermittelt werden soll. Durch das gewählte Vorgehen der anschließenden Situationsanalyse und Optimierung konnten Schwachstellen der initialen Schulung durch Implementierung von Lösungen der Bildungsforschung behoben werden. Die nachfolgende Evaluation zeigte die Wirksamkeit der umgesetzten Lösungen durch positive Evaluation der TeilnehmerInnen.

Durch die Explizierung von Lernzielen und Erfolgskontrolle konnten Elemente des Constructive Alignment dazu genutzt werden, EnhanCE Modelling kontextspezifisch anzupassen. Die Erfolgskontrolle wurde in der Optimierung durch die Betrachtung der einzelnen Modellbildungsschritte verfeinert. Dies erweitert die Erkenntnisse zur Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz, in der bislang nur die Nutzung bereits bestehender C&C²-Modelle mit Novizen untersucht wurden (Gladysz und Albers 2018b).

Die Abwechslung von Praxis- und Theorieteil wurde von den TeilnehmerInnen als positiv empfunden, was zu einem sehr guten Bewertungsergebnis der Struktur der Anwendungsschulung führte. Die Umsetzung der Fertigung im praktischen Teil zeigte eine Herausforderung in der Umsetzung der konstruierten Ideen in CAD und den Übertrag in die Fertigung. Dies führte zu erheblichen Schwierigkeiten im Durchlauf zur Evaluation der Anwendungsschulung, da nicht alle TeilnehmerInnen mit dem verwendeten CAD-System und den CAD-CAM-Schnittstellen vertraut waren. Trotz dieser in der Evaluation auch deutlich erwähnten Schwierigkeiten wurden die Praxisteile sehr gut aufgenommen. Dies bestätigt die Beschreibung von Kaufmann und Eggensperger (2017) zum positiven Einfluss der abwechselnden Struktur einer Lehreinheit.

Die Strukturanalyse mit Hilfe der Bloom'schen Taxonomie führte zur Ableitung von drei Varianten der Schulung. Da nur die Syntheseschulung darauf abzielt, die TeilnehmerInnen zur eigenständigen Modellierung in Herausforderungen ihres beruflichen Alltags zu befähigen, kann hier noch keine Aussage darüber getroffen werden,

ob die TeilnehmerInnen in der Lage sind, den C&C²-Ansatz zielgerichtet in ihrem Arbeitsalltag einzusetzen.

Eine Einschränkung der Evaluationsergebnisse ist, dass die individuellen Lernprozesse nicht erfasst wurden. Da die eigene Motivation der Lernenden und der individuelle Einsatz von Lernstrategien die Wirkung der Schulung beeinflussen können, sollten sie als Störgrößen in weiteren Untersuchungen berücksichtigt werden, um die Aussagenqualität zu erhöhen.

Zur Übertragbarkeit des grundlegenden Konzepts des EnhanCE Modelling kann im Rahmen dieser Forschungsarbeit keine belastbare Aussage getroffen werden, da es nur für den Fall der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz genutzt wurde. Ob die Elemente des Konzepts auf bei anderen Modellbildungsmethoden genutzt werden können, muss in weiterführenden Untersuchungen geprüft werden.

Auf Basis des so entwickelten EnhanCE Modelling wird es möglich, die Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes zu untersuchen, da er nun in der Modellbildung von GFZ durch Novizen im Umgang mit dem C&C²-Ansatz in einer untersuchbaren Aufgabenstellung angewandt wird.

5.8 Modellbildung durch EnhanCE Modelling – Untersuchung der Anwendbarkeit

Die Untersuchung der Anwendbarkeit der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes durch EnhanCE Modelling findet in einem zweistufigen Studiendesign statt. Zunächst wird in der ersten Stufe die Anwendbarkeit in der Anwendungsschulung untersucht, um sicherzustellen, dass die Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes als Entwicklungsziel des EnhanCE Modelling prinzipiell erreicht wurde. Die Anwendungsschulung deckt dabei auch die Syntheseschulung mit ab, da der zur Untersuchung genutzte Abschnitt der gemeinsamen Modellbildung am Beispiel der Keilsicherungsscheibe identisch ist.

In der zweiten Stufe wird untersucht, ob die Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes auch in der inhaltlich stark reduzierten Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling sichergestellt ist. Die praktischen Teile der Anwendungs- und Syntheseschulung stellen einerseits einen essentiellen Teil des EnhanCE Modelling dar, begrenzen aber durch die für ihre Durchführung notwendigen Ressourcen den Einsatz in zeitlich knapperen Rahmen (beispielsweise bei Studien oder Vorstellungen in Unternehmen).

Der Einsatz der Anwendungsschulung ist in Studien aktuell auf etwa 10 Datenpunkte (20 TeilnehmerInnen in Kleingruppen á 2 Personen) pro Durchlauf beschränkt, was für statistisch signifikante Ergebnisse meist nicht ausreicht. Dadurch ist es notwendig, auch die Anwendbarkeit in der Grundlagenschulung, welche auf deutlich größere TeilnehmerInnen-Zahlen ausgelegt ist, zu prüfen und bei Bedarf zu optimieren.

5.8.1 Anwendbarkeit – Stufe 1 Anwendungsschulung

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes in der Anwendungsschulung wird die Durchführung, in welcher die Evaluation der Anwendungsschulung durchgeführt wurde (vgl. auch Kapitel 5.1), genutzt.

Studiendesign: Die Keilsicherungsscheibe (vgl. Kapitel 5.2.1) wird in der Evaluation der Anwendungsschulung durch die oben (Kapitel 5.1) genannten TeilnehmerInnen in geführten Schritten modelliert. Die Aufgabe ist, zu verstehen, warum eine Keilsicherungsscheibe bei Vibrationen nicht löst, und welche Gestaltparameter für dieses Systemverhalten relevant sind. Dabei werden die Schritte der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes gemeinsam mit dem Moderator durchlaufen. Der Moderator sorgt hierbei nur für die Einhaltung der Reihenfolge, gibt aber keine Hilfestellung zur Modellbildung. Hilfsmittel sind die Handouts und die Mitschriften aus dem vorhergegangenen Theorieteil.

Währenddessen werden Beobachtungen durch zwei im Raum vorhandene Beobachter als Freitext notiert. Die durch die TeilnehmerInnen erstellten Dokumente werden eingesammelt. Anschließend werden in einem Expertenworkshop mit dem Moderator und den zwei Beobachtern auftretende Schwierigkeiten aus Beobachtungen und Dokumenten erhoben und zusammengeführt. Zu diesen Schwierigkeiten werden bei Bedarf Lösungen identifiziert und umgesetzt, durch welche die Anwendbarkeit gesteigert werden kann. Diese Optimierung schließt die Entwicklung der Varianten Anwendungs- und Syntheseschulung des EnhanCE Modelling ab.

Ergebnisse: Die erhobenen Ergebnisse zur Anwendbarkeit der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz werden im Folgenden beschrieben. Sie sind anhand der einzelnen Schritten a) bis f) der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes (vgl. Kapitel 2.5.3) gegliedert:

Schritt a) Zweck der Modellbildung notieren: Der erste Schritt der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz ist die Beschreibung des Modellzwecks. Diese ist eine Herausforderung, da die TeilnehmerInnen trotz der vorgegebenen Aufgabe eine große Unsicherheit darin beschrieben, wie ein Modellzweck formuliert werden sollte. Nur vier

TeilnehmerInnen beschrieben eine spezifische Analyse der Ursachen des Systemverhaltens, was einem zielführenden Modellzweck entspricht. Weiter wurde eine reine Funktionsbeschreibung (N = 5), abstrakte Beschreibung einer Analyse (N = 5) und reine Darstellung (N = 3) genannt. Eine Lösung konnte nicht eingeordnet werden.

Schritt b) Systemgrenze in Raum und Zeit festlegen: In der Festlegung der Systemgrenzen in Raum und Zeit waren die Aufgaben als Multiple-Choice Fragen gestellt, in denen verschiedene Zustände vorgegeben wurden. Hier zeigten sich, dass tendenziell zu viele Zustände gewählt wurden. Nur vier TeilnehmerInnen wählten ausschließlich den relevanten Zustand *Schraubverbindung wird belastet*, wobei 3 davon zusätzliche Zustände zunächst gewählt und dann weggestrichen hatten. 12 TeilnehmerInnen wählten zusätzlich den Zustand *Schraubverbindung unbelastet*. 3 TeilnehmerInnen wählten zusätzlich den Zustand *Keilsicherungsscheibe gelöst*. Ein Teilnehmer wählte ausschließlich diesen Zustand. Mit den gewählten Zuständen wäre es 19/20 TeilnehmerInnen möglich gewesen, ein zielführendes C&C²-Modell zu erstellen, wodurch in diesem Schritt keine Herausforderung in der Anwendbarkeit identifiziert wird. Eine Systemgrenze wurde von 18/20 TeilnehmerInnen eingezeichnet. Diese war in 6 Fällen korrekt (beinhaltet Mutter und Schraube), in 11 Fällen zu klein (keine Mutter betrachtet) und in einem Fall zu groß (gesamtes Bild gewählt). Es traten keine Fragen zum Verständnis oder der Umsetzung dieses Modellbildungsschritts auf.

Schritt c) System bei der Funktionserfüllung abbilden: In diesem Schritt traten verschiedene Herausforderungen auf, die zum leichteren Verständnis in Abbildung 5-14 zusammengefasst dargestellt sind.

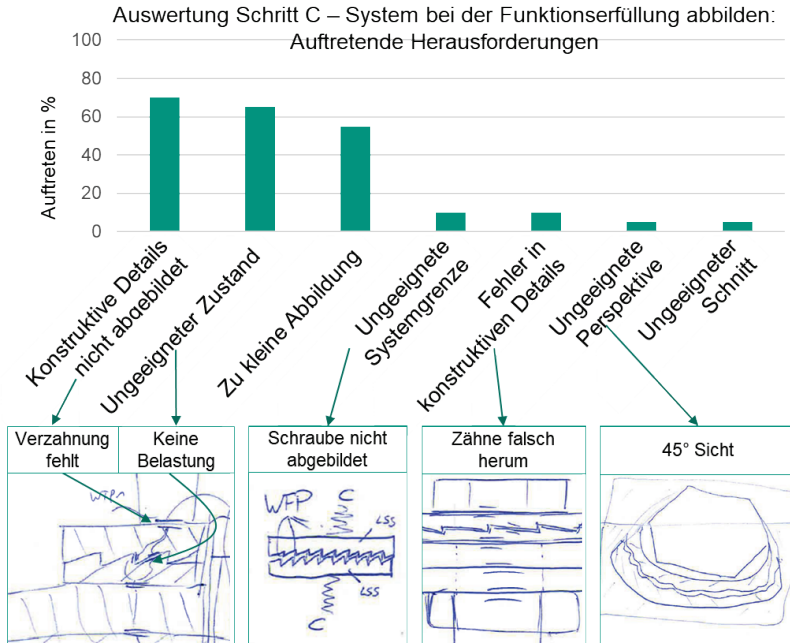


Abbildung 5-14: Herausforderungen in der Erstellung einer Visualisierung der Keilsicherungsscheibe

Den TeilnehmerInnen fiel es schwer, eine Vereinfachung des Systemabbaus so zu erstellen, dass die Kernelemente des C&C²-Ansatzes zielführend integriert werden können. Häufig (14/20 Zeichnungen) entstanden sehr detaillierte Abbildungen, in denen jedoch entscheidende konstruktive Details nicht abgebildet wurden. Weiter wurde häufig (13/20 Zeichnungen) ein ungeeigneter Zustand abgebildet, in welchem ein zusätzliches WFP aktiv war, welches sich unter Belastung auflöst und dadurch die kritische Funktion ermöglicht. 11 von 20 Zeichnungen waren so klein, dass keine Kernelemente mehr eingezeichnet werden konnten.

Schritt d), e) Fluss der Systemgrößen verfolgen und Gestaltfunktionselemente im Systemabbild einzeichnen: Die Schritte d) und e) werden gemeinsam betrachtet, da Schritt d) rein mental abläuft und in Schritt e) dokumentiert wird. Der Schritt des Eintragens von Kernelementen in das Systemabbild wurde teilweise schon während der Bearbeitungszeit der Systemvisualisierung durchgeführt. Es wurden keine Schwierigkeiten beobachtet.

Schritt f) Funktionsrelevante Gestaltparameter identifizieren: Die Identifikation von Parametern in den Kernelementen war für einen Großteil der Probanden zumindest teilweise möglich. So wurde in 18/20 Fällen der Winkel des zentralen WFP genannt. Eine genauere Spezifikation dieses Parameters (Gewindesteigung der Schraube) ist ebenfalls auf Basis des C&C²-Modells möglich, wurde jedoch nur in 5 Fällen erreicht. Der Härtegradient zwischen Schraube und Nordlock-Scheibe wurde in 9 Fällen identifiziert, der Zahnwinkel in diesem WFP in 7 Fällen. Häufig wurden zudem Parameter genannt, welche für das Funktionsprinzip eine untergeordnete Rolle spielen. Beispielsweise Reibkoeffizienten (6 Fälle), Rauheiten (5 Fälle) oder die Setzkraft. Es zeigte sich auch, dass oft Kernelemente modelliert wurden (19/20 Fälle), welchen später keine Parameter zugeordnet wurden.

Der *Schritt g) (Modell verifizieren)* wird im Abschnitt der gemeinsamen Modellbildung der Anwendungsschulung kurz angesprochen, jedoch aufgrund der mit ihm verbundenen Aufwände nicht durchgeführt. In der Syntheseschulung werden am zweiten Schulungstag zusätzliche Methoden für diesen Schritt vermittelt.

Eine Übersicht der zur Optimierung der Anwendbarkeit der Modellbildungsmethode durchgeführten Maßnahmen in der Anwendungsschulung ist in Tabelle 5-7 dargestellt:

Tabelle 5-7: Identifizierte Herausforderungen der Anwendbarkeit in den Schritten der Modellbildungsmethode zum C&C²-Ansatz

SM	Identifizierte Herausforderungen	H	Anpassung der der Anwendungsschulung	Erläuterung der Anpassungen
a)	Formulierung des Modellzwecks kaum möglich	A	Modellzweck wird vorgegeben	Generelle Schwierigkeit jeder Modellbildung
b)	Fokussierung	N	Keine	Keine Anwendungsschwierigkeiten beobachtet
c)	Zu kleine Darstellungen, Fokus nicht auf konstruktive Details	A, N	Beispielaufgabe zu konstruktiven Details und Hinweis auf Skizzengröße	Genannte Aspekte wurden in der Schulung bislang nicht vermittelt (Problem war nicht bekannt)
d, e)	Keine		Keine	-
f)	Kernelemente ohne Parameter modelliert	N	Keine	Keine Anwendungsschwierigkeiten beobachtet
Legende: SM = Schritt der Modellbildungsmethode; H = Bezug der identifizierten Herausforderung; A = Anwendbarkeit; N = Nutzen				

Diskussion: In der Anwendungsschulung wurden die einzelnen Schritte der geführten Modellbildung an der Keilsicherungsscheibe ermittelt. Hierbei traten in zwei Schritten Herausforderungen auf, welche durch entsprechende Maßnahmen adressiert wurden.

Schritt a) Zweck der Modellbildung notieren: Der erste Schritt der Modellbildung, die Beschreibung des Modellzwecks, bestätigt die Herausforderung in der Formulierung von Funktionen, wie sie beispielsweise von Eisenbart et al. (2017) untersucht wurden. Hieraus wurde entschieden, den Modellzweck vorzugeben, da seine Beschreibung eine allgemeine Herausforderung der Modellbildung darstellt (jedes Modell benötigt nach Stachowiak (1973) einen Zweck). Diese Herausforderung zu überwinden, liegt aktuell nicht im Fokus der Modellbildungsmethode zum C&C²-Ansatz.

Schritt c) System bei der Funktionserfüllung abbilden: Aus diesen Erkenntnissen wurde die Schulung in diesem Schritt angepasst, indem ein Hinweis auf die Notwendigkeit einer ausreichenden Größe der Skizze gegeben wurde.

In den anderen Schritten wurden keine Herausforderungen der Anwendbarkeit identifiziert.

Die Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes wird nach der Anpassung der gemeinsamen Modellbildung in der Anwendungsschulung als ausreichend betrachtet. Damit kann der C&C²-Ansatz durch die TeilnehmerInnen nach einer abgeschlossenen Anwendungsschulung des EnhanCE Modelling zumindest in ersten klar definierten Modellbildungsaufgaben angewandt werden.

5.8.2 Anwendbarkeit – Stufe 2 Grundlagenschulung

Das folgende Unterkapitel basiert auf der Publikation (Eisenmann et al. 2021a). Teile des folgenden Texts sind ohne Veränderung aus der Veröffentlichung in deutscher Form übernommen. Der Autor dieser Forschungsarbeit war an der Konzeptionierung, Durchführung und Auswertung der iterativen Pilotstudien beteiligt.

Anschließend an die Untersuchung der Anwendungsschulung wird die Anwendbarkeit der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes in der Grundlagenschulung untersucht. Dazu werden drei iterativ ablaufende Pilotstudien mit 2-4 TeilnehmerInnen durchgeführt. Dies ist notwendig, da nun nicht nur die gemeinsame Modellbildung geprüft wird, sondern auch die Anwendbarkeit der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes in der eigenständigen Modellbildung sichergestellt werden soll.

Studiendesign: Aufbauend auf den Erkenntnissen der Anwendbarkeitsuntersuchung der Stufe 1 (Kapitel 5.8.1) wurden drei iterativ aufeinander folgende Pilotstudien in der Grundlagenschulung durchgeführt. Fokus der Untersuchung war, die Übertragbarkeit der Anwendbarkeit der Modellbildung in die eigenständige Modellbildung zu untersuchen. Dazu wurde neben der gemeinsamen Modellbildung an der Keilsicherungsscheibe auch eine eigenständige Modellbildung in den Systemen Rasthakenverbindung und Kartuschenpresse untersucht (vgl. auch Kapitel 5.2.1). Da die Anwendungsstudie der Stufe 2 auch der Vorbereitung der Validierungsstudie (Kapitel 6) dient, werden die Aufgaben zur Modellbildung hier nicht detailliert beschrieben. Sie werden in Kapitel 6.2.2 vorgestellt. TeilnehmerInnen waren 8 Studierende des Maschinenbaus. An der ersten Pilotstudie nahmen 4 Bachelor-Studierende teil. An den zwei darauffolgenden Pilotstudien nahmen jeweils 2 Master-Studierende teil.

Die Datenerhebung erfolgte durch die Aufzeichnung des gesamten Raumes auf Video. Zusätzlich wurden die Teilnehmer direkt von einem Studienbeobachter pro

Teilnehmer beobachtet. Die Studienbeobachter machten sich Notizen über das Verhalten der TeilnehmerInnen während der Schulung, der gemeinsamen Modellbildung. Die TeilnehmerInnen wurden gebeten, jeden Schritt auf bereitgestellten Dokumentationsmitteln zu dokumentieren. Alle von den Teilnehmern verwendeten Dokumentationsmittel wurden gesammelt. Nach Beendigung der Aufgabe wurden die TeilnehmerInnen gemeinsam befragt. Alle gesammelten Daten wurden qualitativ ausgewertet und diskutiert.

Ergebnisse: In der aus Stufe 1 bereits optimierten gemeinsamen Modellbildung trat in der eigenständigen Durchführung des *Schritt c) System bei der Funktionserfüllung abbilden* eine weitere bislang nicht aufgedeckte Schwierigkeit in der Anwendung auf. Die Einstellung des Schwierigkeitsgrads in diesem Schritt erfolgt durch die Vorgabe einer Systemvisualisierung als Stimulus. In der gemeinsamen Modellbildung der Keilsicherungsscheibe konnte eine Fotografie des Originalsystems genutzt werden, da hier alle konstruktiven Details erkennbar waren. Dies war für die in der eigenständigen Modellbildung genutzten Systeme nicht zielführend, da nicht alle konstruktiven Details in einer Ansicht des Systems erkennbar waren.

In der ersten Pilotstudie wurde deshalb als Stimulus eine technische Zeichnung des zu untersuchenden Systems vorgegeben (siehe Beispiel in Abbildung 5-15, links). Alle TeilnehmerInnen waren in der Lage, die funktionsrelevanten Parameter des technischen Systems schnell zu identifizieren, ohne die Modellbildungsmethode überhaupt anzuwenden. Durch die Befragung der TeilnehmerInnen wurde deutlich, dass die verwendete Zeichnung das System durch den Querschnitt bereits zu sehr vereinfachte. So konnten die TeilnehmerInnen die relevanten Parameter direkt durch Betrachten der Zeichnung identifizieren. Daher sahen sie keine Notwendigkeit, die Modellbildungsmethode zu verwenden. Der Schwierigkeitsgrad des Stimulus wurde aus den Erkenntnissen der Pilotstudie 1 erhöht.

In Pilotstudie 2 wurden die technischen Zeichnungen durch 3D-PDFs der vollständigen technischen Systeme ersetzt (siehe Beispiel in Abbildung 5-15, Mitte). Mit dieser Anpassung mussten die TeilnehmerInnen selbst eine geeignete 2D-Visualisierung für die weitere Analyse finden (ähnlich wie bei der Keilsicherungsscheibe in der gemeinsamen Modellbildung). Die TeilnehmerInnen hatten große Schwierigkeiten, in Schritt c) eine Visualisierung zu erstellen und konnten daher die Modellbildung eigenständig nicht weiter fortführen. Im Interview im Anschluss an Pilotstudie 2 gaben die TeilnehmerInnen an, dass es ihnen schwerfiel, einen passenden Querschnitt zum Verständnis der funktionsrelevanten Parameter der Systeme zu finden. Der Stimulus wurde aus den Erkenntnissen dieser Studie vereinfacht.

Für die dritte Pilotstudie wurden die Konstruktionen angepasst, aber die Systemdarstellung weiter als 3D-PDF vorgegeben. Die Systemdarstellungen in 3D-PDF wurden in ihrer Geometrie vereinfacht, um ein schnelleres Erkennen einer passenden Visualisierung zu ermöglichen (siehe Beispiel in Abbildung 5-15, rechts). Beide Teilnehmer in Pilotstudie 3 waren in der Lage, eine geeignete Visualisierung zu finden und die Modellbildungsmethode eigenständig durchzuführen.

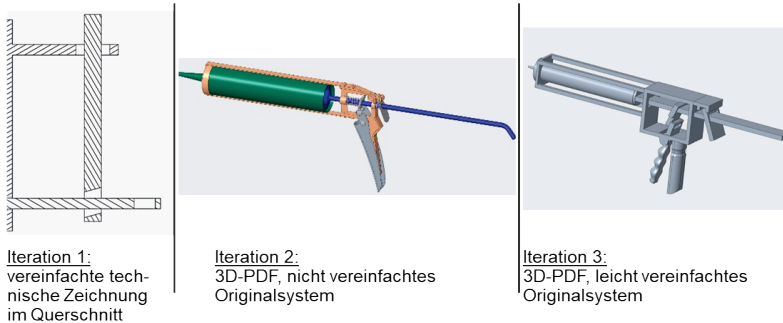


Abbildung 5-15: Entwicklung der Systemdarstellung. Abgebildet ist die Kartuschenpresse als Stimulus für die Modellbildungsaufgabe für die TeilnehmerInnen der Validierungsstudie (Eisenmann et al. 2021a)

Diskussion: Durch die Untersuchung und Optimierung in drei iterativen Pilotstudien konnten weitere Aspekte bezüglich der Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes identifiziert werden. Durch die Anpassung des Detaillierungsgrads der vorgegebenen Systemvisualisierung waren die TeilnehmerInnen in der Lage, mit der in der Grundlagenschulung vermittelten Modellbildungsmethode eigenständig C&C²-Modelle zu bilden. Die Anwendbarkeit der C&C²-A-Modellbildung ist damit ausreichend, um die Validierungsstudie dieser Forschungsarbeit durchzuführen.

Die erzielten Ergebnisse unterliegen gewissen Einschränkungen. Um die Anwendbarkeit zu untersuchen, ist eine Anpassung der Schwierigkeit und Darstellung der Stimuli notwendig. Hierbei besteht die Gefahr, große Unterschiede zum eigentlichen Kontext, für den die Modellbildungsmethode entwickelt wurde zu erzeugen. Diese Lücke zwischen der Anwendung in Studien und in der Praxis sollte in weiterführenden Untersuchungen geschlossen werden, um belastbare Aussagen zur Anwendbarkeit der Modellbildung durch die Grundlagenschulung in realen Problemstellungen der Gestaltung treffen zu können.

5.9 Zusammenfassung der Entwicklung des EnhanCE Modelling

Durch EnhanCE Modelling als entwickelte und hinsichtlich der Anwendbarkeit der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes untersuchte Methodenschulung wird die Forschungsfrage 2 *Wie kann die Modellbildung von GFZ auf Basis des C&C²-A methodisch unterstützt werden, um die zentrale Herausforderung der Anwendbarkeit zu überwinden?* wie folgt beantwortet:

EnhanCE Modelling ermöglicht als Methodenschulung die Vermittlung des C&C²-Ansatzes zur Modellbildung von GFZ in unterschiedlicher Detailtiefe abhängig vom Bedarf der TeilnehmerInnen. Hierfür wurden drei Varianten der Grundlagen, Anwendungs- und Syntheseschulung abgeleitet. Kern aller Schulungsvarianten ist die Abwechslung von praktischen und theoretischen Schulungsteilen, bei denen in den praktischen Teilen Untersuchungen zu den Erfolgsfaktoren Anwendbarkeit und Nutzen möglich ist. Weiteres Merkmal ist die geführte und eigenständige Modellbildung von GFZ mit der vermittelten Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes.

Die Grundlagenschulung vermittelt das Basiswissen zum C&C²-Ansatz und ermöglicht eine erste Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in vorgegebenen Aufgaben. In ihr besteht die Möglichkeit zur Durchführung experimenteller Studien zur Modellbildung. Die Anwendungsschulung erweitert die Grundlagenschulung um praktische Teile, in denen die Modellbildung vertieft wird. Sie bietet die Möglichkeit zur Durchführung von Feldstudien in den praktischen Teilen zur Modellbildung. In der Syntheseschulung werden Anwendungen des C&C²-Ansatz im Unternehmens- und Forschungsumfeld vermittelt und Herausforderungen aus dem Berufsalltag der TeilnehmerInnen bearbeitet. Hierzu werden auch weiterführende Methoden vermittelt. Hier werden Fallstudien in umfangreichen Herausforderungen aus dem Unternehmensumfeld möglich.

Durch EnhanCE Modelling wird die zentrale Herausforderung der unzureichenden Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes wie folgt adressiert:

Durch die Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling wird es möglich, das Vorgehen bei der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz zu untersuchen. Damit wird erstmalig der Einfluss einer Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz auf das Systemverständnis der TeilnehmerInnen untersuchbar. So kann die Forschungsbarriere in der Untersuchung des Nutzens der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz prinzipiell überwunden werden. Für zukünftige Forschung wird es möglich, auch weiterentwickelte Elemente des C&C²-Ansatzes in ihrem Einfluss auf das Systemverständnis experimentell zu bestimmen.

Durch EnhanCE Modelling wird es prinzipiell möglich, die Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz mit geringem Ressourceneinsatz an ProduktentwicklerInnen im Unternehmensumfeld zu vermitteln. Es kann dadurch auch die Basis für eine weitere Verbreitung des C&C²-Ansatzes im Unternehmensumfeld legen.

Die Überwindung der Forschungsbarriere wird im folgenden Kapitel durch eine experimentelle Studie zum Einfluss der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz durch die Grundlagenschulung auf das Systemverständnis untersucht.

6 Validierungsstudie – Systemverständnis durch EnhanCE Modelling

Das folgende Kapitel basiert auf der Publikation (Grauberger et al. 2022). Teile des folgenden Texts sind ohne Veränderung aus der Veröffentlichung in deutscher Form übernommen.

In diesem Kapitel wird die Forschungsfrage 3 *Welchen Einfluss hat die entwickelte methodische Unterstützung auf den Nutzen des C&C²-Ansatzes in der Modellbildung von GFZ?* in einer experimentellen Studie untersucht. Diese Studie wird mit 35 Teilnehmern anhand von zwei technischen Systemen durchgeführt. Als Stimulus dient die Vermittlung der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes in der Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling aus Kapitel 5.5.1. Die Aufgaben in der Studie beinhalten die Analyse von Ursachen für das Systemverhalten der technischen Systeme auf zwei unterschiedlichen Detailebenen des Systemverständnisses. Die Kontrollgruppe löst die Aufgabe mit intuitiven Ansätzen, die Testgruppe nutzt die in der Grundlagenschulung vermittelte Modellbildungsmethode. Auf der Systemebene werden allgemeine Zusammenhänge von Gestalt und Systemverhalten untersucht. Auf der Detailebene werden funktionskritische Systembereiche, sowie funktionsrelevante Systemzustände untersucht.

Zentrale Erkenntnisse:

- Die durch EnhanCE Modelling methodisch unterstützte Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz erhöht das Systemverständnis der TeilnehmerInnen auf der Systemebene bezüglich der Frage „welches Verhalten zeigt die Systemvariante?“
- In der Untersuchung der Identifikation von funktionsrelevanten Zuständen und funktionskritischen Bereichen als zwei Aspekten der Detailebene konnten keine Aussagen über statistisch signifikante Unterschiede abgeleitet werden
- Es werden Herausforderungen bei der Identifikation von funktionskritischen Bereichen und funktionsrelevanten Systemzuständen aufgedeckt, die Erkenntnisse zur Verbesserung der Modellbildungsmethode liefern.
- Mit dem gewählten Studiendesign ist der Modellbildungsprozess erstmalig experimentell beobachtbar.

6.1 Hypothesen der Studie und Operationalisierung der Messgrößen

Aus der dritten Forschungsfrage dieser Forschungsarbeit wird eine Hypothese als Basis der experimentellen Untersuchung formuliert:

Qualitative Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz unterstützt den Aufbau von qualitativem Systemverständnis.

Dieses Systemverständnis kann auf verschiedenen Ebenen gemessen werden. Eckert et al. (2011) beschreiben fünf Ebenen der Beschreibung von Funktionen, ausgehend von der übergreifenden Systemebene bis hin zum detaillierten Systemverhalten, das sich aus den Details der Ausprägung ableitet. Für diese Untersuchung wird die Hypothese in drei Teilhypothesen unterteilt. Die erste Teilhypothese betrachtet ein allgemeines Verständnis des Systemverhaltens und korreliert mit den ersten beiden Ebenen der Funktionsbeschreibung (Hauptfunktion und erste Unterfunktion) von Eckert et al. (2011). Diese Ebenen werden im Folgenden als Systemebene bezeichnet.

Teilhypothese H1: Qualitative Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz erhöht das qualitative Systemverständnis auf der Systemebene von technischen Systemen.

Die zweite und dritte Teilhypothese betrachten Detailebenen des Systemverständnisses. Sie fokussieren die Frage, wann und wo welche Details der Ausprägung das Systemverhalten beeinflussen. Dies korreliert mit den Ebenen drei bis fünf (Hilfsfunktionen, die das detaillierte Systemverhalten beschreiben) von Eckert et al. (2011) und wird als Detailebene bezeichnet. Die Teilhypothesen lauten wie folgt:

Teilhypothese H2: Qualitative Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz erhöht die Anzahl der identifizierten funktionsrelevanten Zustände des Systems.

Teilhypothese H3: Qualitative Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz erhöht die Anzahl der identifizierten funktionskritischen Bereiche des Systems.

Die Überprüfung dieser Teilhypothesen erfordert ein Experiment, in dem die Variablen der Hypothesen kontrolliert eingestellt werden können (vgl. auch Kapitel 2.7.1 zu Herausforderungen der Methodvalidierung). Dazu muss die Komplexität einer praxisrelevanten Modellbildungsaufgabe in der Gestaltung deutlich reduziert werden. Die Umsetzung von praxisrelevanten Aufgaben in einer Laborumgebung für experimentelle Untersuchungen erfordert aufwendige Vorstudien, bevor ein Experiment durchgeführt werden kann. Es muss sichergestellt werden, dass die Elemente der Studie eine Untersuchung der Hypothesen ermöglichen. Beispielsweise muss der Aufgabenschwierigkeitsgrad so eingestellt werden, dass Effekte messbar sind, d.h. er darf weder zu gering noch zu hoch sein.

6.2 Studiendesign der Validierungsstudie

In diesem Abschnitt wird die Operationalisierung der Variablen für die Teilhypothesen, der Studienaufbau und die TeilnehmerInnen beschrieben.

6.2.1 Operationalisierung und Messung der Variablen

Das übergeordnete Ziel dieser experimentellen Studie ist es, die Unterstützung der Gewinnung eines qualitativen Verständnisses technischer Systeme zu untersuchen. Die unabhängige Variable für alle drei Hypothesen ist die „Vermittlung der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes durch die Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling“ (VMG). Sie wird gegen das intuitive Vorgehen der TeilnehmerInnen verglichen. Die abhängige Variable ist das Systemverständnis auf verschiedenen Detailebenen. Die notwendige Operationalisierung der abhängigen Variable erfolgt durch die Ableitung von messbaren Variablen für das Verständnis von technischen

Systemen auf den verschiedenen Ebenen der Hypothesen H1, H2 und H3. Eine Übersicht ist in Abbildung 6-1 dargestellt.

Forschungshypothese		Qualitative Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz unterstützt den Aufbau von qualitativem Systemverständnis.			
Messbare Teilhypothese	Systemebene	Wie verhält sich das System?			
		H1: Qualitative Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz erhöht das qualitative Systemverständnis auf der Systemebene von technischen Systemen.			
		uV	VMG – intuitives Vorgehen		
		aV	Korrekte Zuordnung der Gestalt zu einem Systemverhalten		
	Test	Wilcoxon Test, Mann Whitney U Test			
	Detailebene	Welche Zustände sind funktionsrelevant?		Welche Bereiche sind funktionskritisch?	
		H2: Qualitative Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz erhöht die Anzahl der identifizierten funktionsrelevanten Zustände des Systems.		Teilhypothese H3: Qualitative Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz erhöht die Anzahl der identifizierten funktionskritischen Bereiche des Systems.	
		uV	VMG – intuitives Vorgehen	uV	VMG – intuitives Vorgehen
		aV	Korrekte Auswahl der funktionsrelevanten Zustände für ein Systemverhalten	aV	Korrekte Auswahl funktionskritischer Bereiche für ein Systemverhalten
		Test	Exakter Fisher-Test, Pearson Chi ² test	Test	Exakter Fisher-Test, Pearson Chi ² test

Legende:

H1-H3 = Teilhypothesen aV = abhängige Variable uV = unabhängige Variable
 VMG = Vermittlung der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes durch die Grundlagenschulung des EnhanCE Modellung

Abbildung 6-1: Überblick über die Forschungshypothesen, Variablen und anwendbaren Teststatistiken für die experimentelle Methodenvvalidierungsstudie (Grauberger et al. 2022)

Auf der Systemebene erfolgt die Operationalisierung durch die *korrekte Zuordnung der Gestalt zu einem Systemverhalten*. Es wird gemessen, ob die TeilnehmerInnen in der Lage sind zu verstehen, wie sich das System aufgrund einer gegebenen Gestalt während einer definierten Betriebsart verhalten wird. Es wird nicht untersucht, ob die Teilnehmer die detaillierte Ursache für das Systemverhalten kennen. Die Zuordnung erfolgt über einen Vergleich einer vorgegebenen Variante des Beispielsys-

tems mit vier möglichen Verhaltensweisen in Single-Choice-Antworten. Eine Rückmeldung, ob die Antwort richtig war, wird nicht gegeben. Jede/r TeilnehmerIn werden sechs Aufgaben gestellt, wobei für jede richtige Lösung ein Punkt vergeben wird. Maximal sind sechs Punkte möglich. Die resultierende Variable ist metrisch skaliert, was statistische Auswertungen mit dem Mann-Whitney-U-Test oder Wilcoxon-Test ermöglicht.

Auf der Detailebene des Systemverständnisses wird die Fähigkeit untersucht, sowohl funktionsrelevante Systemzustände als auch funktionskritische Details des technischen Systems, die das vorhergesagte Verhalten verursachen, zu erkennen. Diese Ebene wird durch die *korrekte Auswahl von funktionsrelevanten Systemzuständen* und *funktionskritischen Bereiche für ein Systemverhalten* operationalisiert.

Die Auswahl der funktionskritischen Bereiche erfolgt über eine Image-Map¹ des Beispielsystems, in der Bereiche markiert werden können, die als kritisch für das Systemverhalten angenommen werden. Die Bereiche werden unterschieden in funktionskritische Bereiche, Bereiche, die an der Funktionserfüllung beteiligt sind und Reststruktur. Bei den Antworten wird unterschieden, ob nur die kritischen Bereiche markiert sind (richtig), ob auch funktionsbeteiligte Bereiche ausgewählt wurden (Fokus zu weit) oder ob auch Reststruktur ausgewählt wurde. Diese kategoriale Variable ermöglicht eine statistische Auswertung mit dem exakten Fischer-Test oder dem Pearson-Chi²-Test erlaubt.

Die Auswahl der funktionsrelevanten Zustände in der Detailebene erfolgt über einen Multiple-Choice-Fragebogen, bei dem verschiedene Zustände ausgewählt werden können, die als funktionsrelevant angenommen werden. Die Ergebnisse werden in relevante und nicht relevante Zustände eingeteilt, was zu drei Kategorien führt. Es werden nur die relevanten Zustände ausgewählt (richtig), es werden relevante und nicht relevante Zustände ausgewählt (Fokus zu weit) und als dritte Kategorie, dass relevante Zustände fehlen. Diese Variable ist ebenfalls kategorial, was eine statistische Auswertung durch den exakten Fischer-Test oder den Pearson-Chi²-Test erlaubt.

6.2.2 Untersuchungsumgebung und Studienablauf

In klassischen Experimenten wird eine Kontrollgruppe mit einer Testgruppe verglichen, welche mit einem Stimulus behandelt wurde. Dieser Aufbau erzeugt einen

¹ Eine Imagemap ist eine interaktive Grafik, in der Bereiche durch den Anwender ausgewählt werden können.

Datenpunkt pro Teilnehmer und lässt keine Rückschlüsse auf die individuellen Fähigkeiten der einzelnen Teilnehmer zu. Diese Rückschlüsse sind gerade in der Forschung zur Produktentwicklung wichtig, da individuelle Erfahrungen und Herangehensweisen einen erheblichen Einfluss auf das Studienergebnis haben können. Zudem sind außerhalb der Forschung zu Kreativitätsmethoden meist keine experimentellen Referenzstudien vorhanden, aus denen ein Effekt unterschiedlicher Fähigkeiten als Störgröße abgeschätzt werden kann.

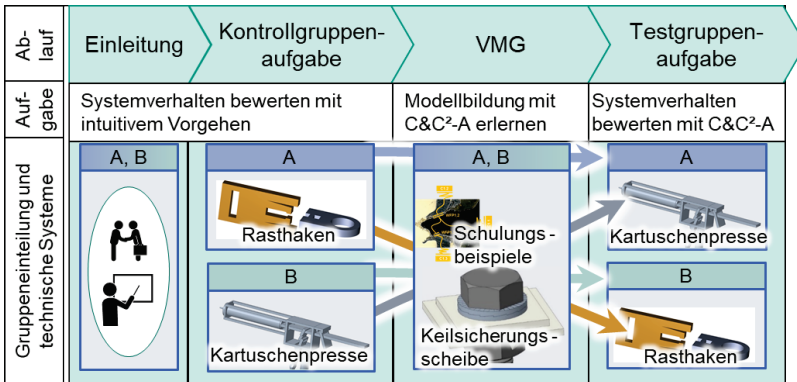
In Erweiterung zur klassischen Anordnung können experimentelle Studien auch als Crossover-Design durchgeführt werden. Dieses Studiendesign ermöglicht zuverlässige Befunde mit weniger Teilnehmern, da jeder Teilnehmer sowohl in der Test- als auch in der Kontrollgruppe platziert wird. Dadurch wird die Störgröße der individuellen Fähigkeiten reduziert, da die Erfahrungen und Vorgehensweisen beide generierten Datenpunkte beeinflussen. In diesem Studiendesign können sowohl Vergleiche innerhalb einer Gruppe als auch zwischen Kontroll- und Testgruppe durchgeführt werden, was eine tiefergehende Analyse der gewonnenen Daten ermöglicht. Nachteile sind Verschleppungs- und Ordnungseffekte, die die Ergebnisse beeinflussen können (Mills et al. 2009). Auch für die Untersuchung von Langzeiteffekten des Stimulus (z.B. Impfungen) sind Crossover-Designs schwierig, da die notwendige Auswaschungsphase, in welcher der Stimulus seine Wirkung verliert, Jahrzehnte benötigen kann.

Es wird eine Langzeitwirkung des Stimulus "Vermittlung der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes durch die Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling" erwartet. Dadurch ist die Nutzung eines Crossover-Designs nicht möglich und es wird das Studiendesign eines klassischen Experiments gewählt. Da jedoch der Einfluss der individuellen Erfahrung als relevant erachtet wird, wird jeder Teilnehmer einmal in der Kontrollgruppe und einmal in der Testgruppe eingesetzt. Die Aufgabe der Kontrollgruppe geht dabei der der Testgruppe aufgrund der Langzeitwirkung des Stimulus immer voraus. Um Ordnungseffekte zu minimieren, wird bei den Aufgaben der Kontrollgruppe kein Feedback gegeben. Zudem werden in der Kontrollgruppe und der Testgruppe unterschiedliche Systeme verwendet. Daher beschränkt sich der Lerneffekt auf ein schnelleres Erfassen der Aufgabenstellung. Dies wird als unkritisch angesehen, da genügend Zeit für alle Teilnehmer zur Verfügung steht, um die Aufgaben zu bearbeiten. Das gewählte Studiendesign kann daher als klassisches Experiment mit Doppelnutzung der Teilnehmer angesehen werden.

Für die Aufgabenbearbeitung in dem gewählten Studiendesign werden zwei Systeme benötigt (eines in der Kontrollgruppe und eines in der Testgruppe. Dazu werden technische Systeme von überschaubarer Komplexität ausgewählt, die anspruchsvolle GFZ enthalten. In den Aufgaben der Studie werden eine

Rasthakenverbindung und ein Vorschubmechanismus einer Kartuschenpresse verwendet. Diese Systeme sind den Teilnehmern aus dem Alltag bekannt, stellen aber in ihren Details selbst für Experten in der Gestaltung eine Herausforderung dar, was aus vorangehenden Erfahrungen in Schulungs- und Studiendurchführungen am IPEK – Institut für Produktentwicklung bekannt ist.

Um die Reproduzierbarkeit zu erhöhen, ist die gesamte Studie als Online-Kurs über die ILIAS-Plattform (www.ilias.studium.kit.edu) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) angelegt. Sie wird zusätzlich über Microsoft Teams moderiert und dauert etwa 2 Stunden. Die Grundlagenschulung als Stimulus wird über ein vorab aufgezeichnetes Video gehalten, um Einflüsse durch die Studienleiter zu vermeiden. Die Übersicht über dieses Studiendesign ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Die TeilnehmerInnen werden nach dem Zufallsprinzip in zwei gleich große Gruppen A und B eingeteilt, die unterschiedlichen Kanälen in Microsoft Teams zugeordnet werden und sich dadurch nicht austauschen können. Die Aufgaben in der Kontroll- und Testgruppe beinhalten die Untersuchung auf Systemebene und anschließend die beiden Untersuchungen auf Detailebene. Die in der Übersicht dargestellten technischen Systeme und Aufgaben werden im folgenden Abschnitt detailliert erläutert.



Legende: C&C²-A = C&C²-Ansatz A = Probandengruppe A B = Probandengruppe B
 VMG = Vermittlung der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes durch die Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling

Abbildung 6-2: Aufbau der experimentellen Studie mit Darstellungen der verwendeten Systeme in der Kontroll- und Testgruppe sowie der VMG als Stimulus (Grauberger et al. 2022)

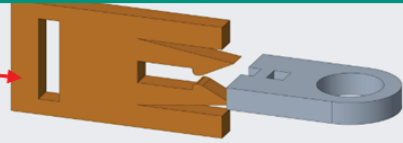
Die Studie beginnt mit einer Einführungsaufgabe, in der der Fokus auf die Betrachtung von konstruktiven Details gelegt wird. Ziel dieser Aufgabe ist es, Fehler zu reduzieren, die aus einem Missverständnis des Aufgabenfokus resultieren. Dann werden die Aufgaben der Kontrollgruppe getrennt für die beiden Gruppen A und B durchgeführt. Anschließend findet die Vermittlung der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes durch die Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling statt. Darauf folgend werden die Aufgaben der Testgruppe durchgeführt. Hierbei werden die Systeme aus Gruppe A und B getauscht. Die Aufgaben sind identisch zu den in der Kontrollgruppe gestellten, es werden jedoch Ergebnisse der einzelnen Modellbildungsschritte abgefragt, um die Anwendung der Modellbildungsmethode sicherzustellen.

Systemebene - Untersuchung des Verhaltens: Zu Beginn untersuchen die beiden Gruppen A und B in der Kontrollgruppe das Systemverhalten von sechs verschiedenen Varianten der Rasthakenverbindung (Gruppe A) bzw. der Kartuschenpresse (Gruppe B). Diese Varianten unterscheiden sich in ihren konstruktiven Details. In diesem Schritt wird keine methodische Unterstützung gegeben, die Teilnehmer gehen intuitiv vor. Abbildung 6-3 gibt einen Überblick über die Aufgaben am Beispiel einer Variante des Rasthakens.

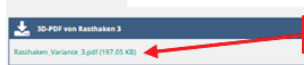
Aufgabenbeschreibung

Diese Abbildung zeigt die Rasthakenverbindung Nr. 3. Nehmen Sie anhand dieser Darstellung die Bewertung des Systemverhaltens vor. Falls Sie weitere Details analysieren wollen, nutzen Sie das unten bereitgestellte 3D-PDF

Überblick in der 2D-Abbildung




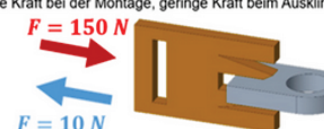


3D-PDF für weiterführende Analyse



Wählen Sie das Verhalten, das die Rasthakenverbindung 3 zeigt

Mögliche Systemverhalten:

<p>Verhalten 1: Nicht montierbar Keine zerstörungsfreie Montage möglich</p>  <p>$F \rightarrow \infty$</p>	<p>Verhalten 2: Nicht lösbar Kein zerstörungsfreies Ausklinken möglich</p>  <p>$F = 10\text{ N}$ $F \rightarrow \infty$</p>
<p>Verhalten 3: Funktion erfüllt Leicht montierbar, ausklinken unter hoher Kraft möglich</p>  <p>$F = 10\text{ N}$ $F = 150\text{ N}$</p>	<p>Verhalten 4: Schwer montierbar Hohe Kraft bei der Montage, geringe Kraft beim Ausklinken</p>  <p>$F = 150\text{ N}$ $F = 10\text{ N}$</p> <p style="text-align: center; font-size: small;">Die graue Aufnahme ist fest eingespannt.</p>

Welches Systemverhalten liegt vor?

- Systemverhalten 1
- Systemverhalten 2
- Systemverhalten 3
- Systemverhalten 4

Auswahlfeld für die TeilnehmerInnen

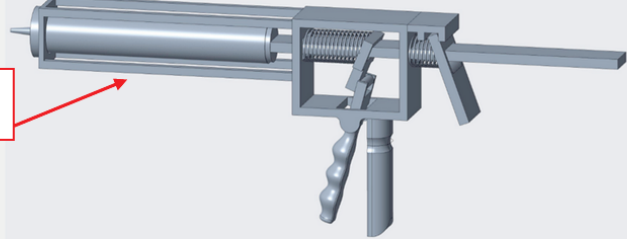
Abbildung 6-3: Beispiel für eine der sechs Aufgaben der Rasthakenverbindung auf der Systemebene mit Aufgabenbeschreibung, Verhaltensvorlage und Auswahlfeld (Grauberger et al. 2022)

Oben auf der Seite wird die Aufgabenbeschreibung wiederholt und es wird ein Bild der Systemvariante gezeigt. Darunter ist ein 3D-PDF zugänglich, in dem bei Bedarf

Details des Systems untersucht werden können. Anschließend werden die möglichen Verhaltensweisen mit Bildern und Visualisierungen der während der Funktionserfüllung wirkenden Kräfte (farbige Pfeile) beschrieben, da dies in vorangegangenen Tests der Aufgaben als der schnellste Weg zum Verständnis des Verhaltens identifiziert wurde. Unten muss die Auswahl des Systemverhaltens von den Teilnehmern getroffen werden. Die richtige Antwort gibt einen Punkt, alle anderen geben null Punkte. Daher können bei dieser Aufgabe maximal sechs Punkte durch die sechs untersuchten Varianten erreicht werden. Die Aufgaben für die Kartuschenpresse sind ähnlich aufgebaut und werden in Abbildung 6-4 dargestellt.

Aufgaben-
beschreibung Diese Abbildung zeigt die Kartuschenpresse Nr. 3. Nehmen Sie anhand dieser Darstellung die Bewertung des Systemverhaltens vor. Falls Sie weitere Details analysieren wollen, nutzen Sie das unten bereitgestellte 3D-PDF

Überblick in der 2D-Abbildung







2D Darstellung Kartuschenpresse System 3

3D-PDF von Kartuschenpresse 3
kartuschemp_system_3.pdf (1,05 MB)

3D-PDF für weiterführende Analyse

Wählen Sie das Verhalten, das die Rasthakenverbindung 3 zeigt

<p style="text-align: center; font-weight: bold;">Verhalten 1: System blockiert</p> <p style="font-size: small;">Druck kann nicht erhöht werden, wird aber gehalten</p> 	<p style="text-align: center; font-weight: bold;">Verhalten 2: Funktion erfüllt</p> <p style="font-size: small;">Druck kann erhöht werden und wird gehalten.</p> 
<p style="text-align: center; font-weight: bold;">Verhalten 3: Kein Druckaufbau</p> <p style="font-size: small;">Druck kann weder erhöht noch gehalten werden</p> 	<p style="text-align: center; font-weight: bold;">Verhalten 4: Direkter Druckabbau</p> <p style="font-size: small;">Druck kann erhöht werden, wird aber nicht gehalten</p> 

Welches Systemverhalten liegt vor?

Systemverhalten 1
 Systemverhalten 2
 Systemverhalten 3
 Systemverhalten 4

Auswahlfeld für die TeilnehmerInnen

Vier mögliche Systemverhalten, die sich durch die Ausprägung der Kräfte F unterscheiden

Abbildung 6-4: Beispiel für eine der sechs Aufgaben zur Kartuschenpresse auf der Systemebene mit Aufgabenbeschreibung, Verhaltensvorlage und Auswahlfeld (Grauberger et al. 2022)

Detailebene - Untersuchung der funktionsrelevanten Zustände: Auf der Detailebene werden die funktionsrelevanten Systemzustände und funktionskritischen Details untersucht. Sie sind in der Übersicht in Abbildung 6-5 dargestellt. Für die Systemzustände ist ein Multiple-Choice-Fragebogen mit 6 möglichen Zuständen für die Rasthakenverbindung und 5 möglichen Zuständen für die Kartuschenpresse vorgesehen. Für beide System sind je zwei Zustände für die gewünschte Funktion relevant. Die Antworten werden in drei Kategorien eingeteilt. Die richtige Antwort ist erreicht, wenn die beiden funktionsrelevanten Zustände ausgewählt sind. Bei der

Auswahl weiterer Zustände fällt die Antwort in die nächste Kategorie, da sie zwar richtig sein kann, der Analyseaufwand aber stark ansteigt, wenn weitere Zustände berücksichtigt werden müssen. Wenn keine funktionsrelevanten Zustände ausgewählt werden, fällt die Antwort in die dritte Kategorie, da fehlende Zustände ein umfassendes Systemverständnis erschweren.

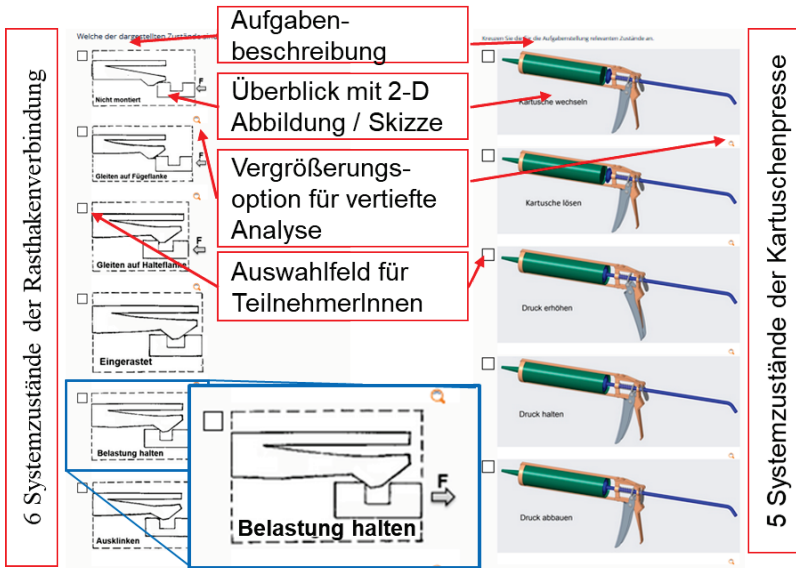


Abbildung 6-5: Zustände der Rasthakenverbindung und der Kartuschenpresse in einer Multiple-Choice-Aufgabe (Grauberger et al. 2022)

Detailebene - Untersuchung der funktionskritischen Details: Im Folgenden werden die funktionskritischen Details der betrachteten Systeme mit Hilfe von Image-Maps untersucht. Sie sind in der Übersicht in Abbildung 6-6 dargestellt. Dabei wird das Systemabbild in funktionskritische Bereiche, funktionsbeteiligte Bereiche und Reststruktur unterteilt. Als funktionskritische Bereiche werden die Bereiche bezeichnet, in denen Änderungen der Parametereinstellungen einen großen Einfluss auf die Funktionserfüllung haben. Wenn sich z. B. der Winkel α im funktionskritischen Bereich an der Spitze des Rasthakens (Abbildung 6-6, linke Seite) um 5° ändert, verdreifacht sich die Montagekraft, wodurch die Funktion der Montage der Rasthakenverbindung erschwert wird. Bereiche, die an der Funktion beteiligt sind, sind

zwar generell relevant, z. B. müssen sie den Rasthaken mit der Montagevorrichtung verbinden. Sie können jedoch freier gestaltet werden, ohne die Funktion zu beeinflussen. Als Reststruktur werden Bereiche bezeichnet, die vollständig entfernt werden können, ohne das Systemverhalten zu verändern. Die Antworten werden entsprechend der gewählten Bereiche in vier Kategorien eingeteilt. Die richtige Antwort wird erreicht, indem nur die funktionskritischen Bereiche markiert werden. Wenn neben den kritischen auch funktionsbeteiligte Bereiche gewählt werden, fällt die Antwort in die zweite Kategorie, da sie zwar prinzipiell richtig, aber zu weit gefasst ist, was zu unnötigem Aufwand bei der Analyse führt. Die dritte Kategorie enthält Antworten, bei denen nur die funktionsbeteiligten Bereiche ausgewählt werden, was ein umfassendes Systemverständnis erschwert. Die letzte Kategorie enthält Antworten, bei denen die Reststruktur ausgewählt wird.

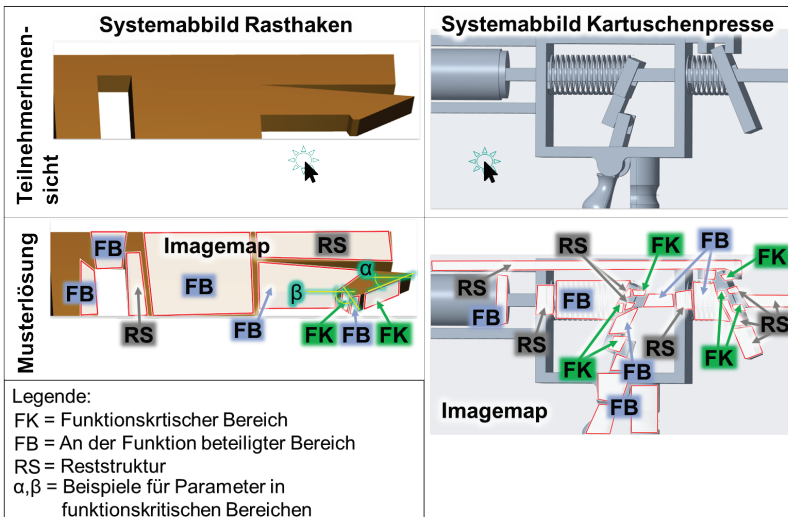


Abbildung 6-6: Ansichten der Image-Maps der Beispielsysteme mit Unterscheidung von funktionskritischen und funktionsrelevanten Bereichen sowie Reststruktur (Grauberger et al. 2022)

VMG als Stimulus: Auf die Detailaufgabe der Kontrollgruppe folgt die Vermittlung der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes durch die Grundlagenschulung des Enhance Modelling, welche beide Gruppen gemeinsam als Videoaufzeichnung im ILIAS-Kurs enthalten. Für Fragen steht zusätzlich ein dritter Kanal in Microsoft Teams bereit, in dem die TeilnehmerInnen beider Gruppen während der Grundlagenschulung eingewählt sind. In diesem Kanal sind zwei Modellbildungsexperten

anwesend. Während der Schulung ist die Kommunikation zwischen den Teilnehmern untersagt, um Diskussionen über die Aufgaben der Kontrollgruppe zu vermeiden.

Nach der VMG werden die Teilnehmer wieder in die beiden Gruppen A und B aufgeteilt. Sie erhalten das System, welches die andere Gruppe in der Kontrollgruppe bearbeitet hat. Während der Arbeit an der gleichen Aufgabe wird nun die Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes angewendet. Die Teilnehmer müssen Ergebnisse der einzelnen Schritte der Modellbildungsmethode abliefern, wodurch die Anwendung der Methode sichergestellt wird.

6.2.3 Studienteilnehmer

An der experimentellen Studie nahmen 36 Teilnehmer ohne Expertenwissen im C&C²-Ansatz teil. Die Teilnehmer wurden aus Lehrveranstaltungen und dem Forschungsnetzwerk des IPEK – Institut für Produktentwicklung akquiriert. Der Fokus lag auf der Auswahl homogener Gruppen hinsichtlich ihrer Erfahrung in der Gestaltung. Es war wichtig, dass eine gewisse Mindest Erfahrung in der Gestaltung vorhanden war, da der C&C²-Ansatz darauf abzielt, Produktentwickler in der Gestaltung zu unterstützen. Die Auswahl von Experten mit Berufserfahrung im Unternehmensumfeld kann jedoch zu einer großen Streuung hinsichtlich der Modellbildungsfähigkeiten führen. Daher werden Studierende eines Masterstudiengangs und wissenschaftliche MitarbeiterInnen als Zielgruppe gewählt.

Die Studie wird in zwei Durchläufen an zwei verschiedenen Terminen mit demselben Online-Setup durchgeführt. Durchlauf 1 wird mit 24 Studenten des Masterstudiengangs Gerätekonstruktion am IPEK – Institut für Produktentwicklung durchgeführt. Diese Teilnehmer hatten bereits ein theoretisches Grundwissen über den C&C²-Ansatz aus Vorlesungen in ihrem Studium. Sie nahmen bislang nicht an einer Schulung zur Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz teil. Daher wird angenommen, dass ihr Wissen über die Modellbildungsmethode nicht ausreicht, um sie in der Aufgabenstellung der Kontrollgruppe anzuwenden.

Durchlauf 2 wird mit 12 wissenschaftlichen Mitarbeitern des pmd der TU Darmstadt durchgeführt. Diese Teilnehmer haben bereits Erfahrung auf dem Gebiet der Gestaltung. Sie kennen den C&C²-Ansatz prinzipiell, jedoch war keiner von ihnen mit der Modellierungsmethode und ihrer Anwendung vertraut.

6.2.4 Datenerfassung und -analyse

Zunächst werden Ausreißer der metrisch skalierten Variable *korrekte Zuordnung der Gestalt zu einem Systemverhalten* der Systemebene (Punktzahl 0-6 Punkte, vgl. auch Abschnitt 2.2.1) identifiziert und überprüft. Zur Überprüfung, ob die Stichprobe normalverteilt ist, wird der Kolmogorov-Smirnov-Test verwendet. Für die weitere Analyse werden aufgrund der nicht vorhandenen Normalverteilung nicht-parametrische Tests gewählt.

Zur Identifikation von möglichen Effekten aus den gebildeten Gruppen A und B sowie der Durchläufe 1 und 2 wird der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt. Es wird geprüft, ob die Randomisierung der Sortierung der Teilnehmer in die Gruppen A und B angenommen werden kann. Außerdem werden die Ergebnisse in den beiden Durchgängen verglichen, um mögliche signifikante Unterschiede zwischen den Studierenden und den wissenschaftlichen MitarbeiterInnen zu identifizieren.

Bei gekoppelten Stichproben wird der Wilcoxon-Test verwendet. Dies gilt für die Analyse, die die Unterschiede zwischen der Kontroll- und der Testgruppe untersucht, da diese von denselben Teilnehmern erhoben werden. Für unabhängige Stichproben wird der Mann Whitney U-Test verwendet. Dies betrifft die Betrachtung von Unterschieden in den Schwierigkeitsgraden der beiden Systeme.

Für funktionsrelevante Zustände und funktionskritische Bereiche wird der exakte Fisher-Test verwendet, da die Variablen kategorial sind und in einigen Kategorien zu wenige Datenpunkte für die Anwendung des Pearson Chi²-Tests erhoben werden. Das gewählte Signifikanzniveau ist $p = 0,05$.

6.3 Ergebnisse der Validierungsstudie

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung dargestellt. Zunächst werden die Ergebnisse der Untersuchung der Systemebene einschließlich der Überprüfung der Datenqualität beschrieben. Danach werden die Ergebnisse der Detailebene beschrieben.

6.3.1 Untersuchung auf Systemebene

Bevor die statistische Auswertung erfolgt, müssen Datenqualität und Randbedingungen überprüft werden. Um sicherzustellen, dass die vorhandenen Daten für die

geplante Analyse verwendet werden können, wurden sie auf Ausreißer geprüft, indem der Boxplot der abhängigen Variable *korrekte Zuordnung der Gestalt zu einem Systemverhalten* analysiert wurde. Bei dieser Überprüfung wurde ein Ausreißer gefunden. Eine detaillierte Untersuchung dieses Datensatzes ergab einen Hinweis auf eine eingeschränkte Leistungsfähigkeit aus gesundheitlichen Gründen im Abschlusskommentar. Der Datensatz dieses Teilnehmers (Student im ersten Durchgang) wurde daher aus der Analyse ausgeschlossen. Somit werden insgesamt 35 TeilnehmerInnen (N=35) mit je zwei Datenpunkten (Kontroll- und Testgruppe) in den statistischen Analysen betrachtet.

Die erste Datenqualitätsanalyse ist die Auswertung, ob die Modellbildungsmethode von den TeilnehmerInnen verwendet wurde. Da keine Software zur Modellbildung vorgegeben wurde, sollten die TeilnehmerInnen die Modelle auf Papier oder in einem Zeichenprogramm skizzieren. Indikatoren für die durchgeführte Modellbildung waren Scans oder Screenshots von den erstellten Modellen, die nach der Studie gesammelt wurden. Die Teilnehmer arbeiteten von zu Hause aus, daher war die Rückgabe der erstellten Modelle weniger einfach kontrollierbar als bei Laborstudien vor Ort.

30 der 36 TeilnehmerInnen reichten Zeichnungen von C&C²-Modellen ein. Für die sechs fehlenden Modelle wurden die Arbeitszeiten in den einzelnen Schritten der Modellbildungsmethode mit denen der anderen TeilnehmerInnen verglichen. Da der Zeitrahmen zur Bearbeitung ähnlich zu den TeilnehmerInnen war, welche Modelle abgeliefert hatten (z. B. 5 bis 7 Minuten im Schritt c) Systemvisualisierung, siehe auch Kapitel 2.5.3), wird davon ausgegangen, dass eine Modellbildung stattfand, auch wenn möglicherweise kein fertiges C&C²-Modell erstellt wurde.

In Abbildung 6-7 ist ein Überblick über die Untersuchung der Gruppe und den Einfluss des Durchlaufs auf die Veränderung des Systemverständnisses gegeben. Die Punktzahl in der Systembewertung beschreibt den Anteil der richtig gewählten Lösungen durch die Teilnehmer und reicht von 0 bis 6.

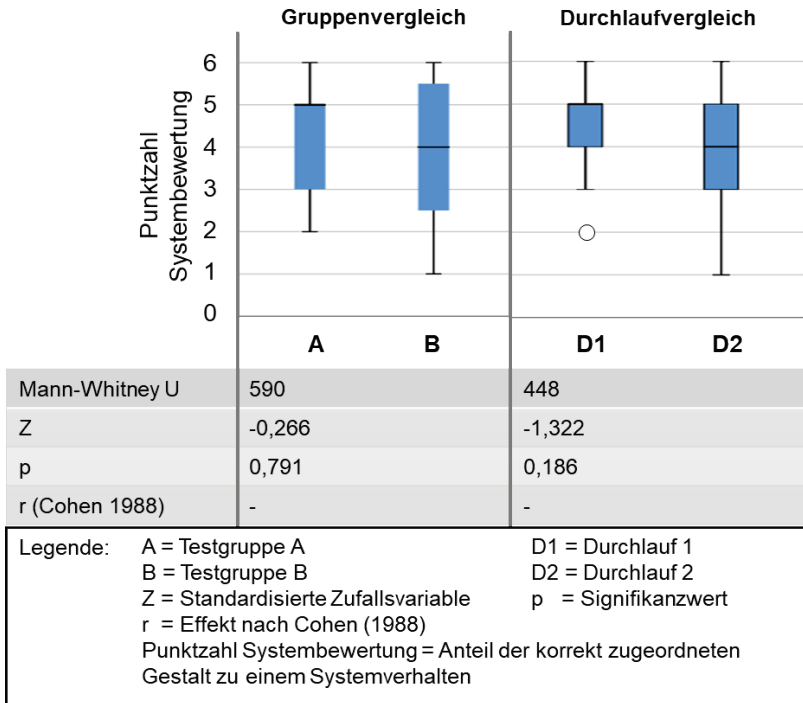


Abbildung 6-7: Untersuchung des Einflusses der Gruppe und des Laufs auf den Score in der Systembewertung (Veränderung des Systemverständnisses auf Systemebene) (Grauberger et al. 2022)

Ein Vergleich der Gruppen A und B, denen die Teilnehmer zufällig zugeordnet wurden, zeigt erwartungsgemäß keinen statistisch signifikanten Effekt. Ein Vergleich des ersten Durchgangs (Studierende mit theoretischem Vorwissen zum C&C²-Ansatz) mit dem zweiten Durchgang (wissenschaftliche MitarbeiterInnen ohne theoretisches Vorwissen zum C&C²-Ansatz) zeigt ebenfalls keinen statistisch signifikanten Effekt. Damit ist die Untersuchung eines Effekts der Modellbildungsmethode auf das Systemverständnis auf der Systemebene möglich.

Das Hauptergebnis dieser Untersuchung zeigt den Einfluss der Modellierungsmethode auf das Systemverständnis. Die Ergebnisse der Kontrollgruppe und der Testgruppe sind in Abbildung 6-8 im Vergleich visualisiert.

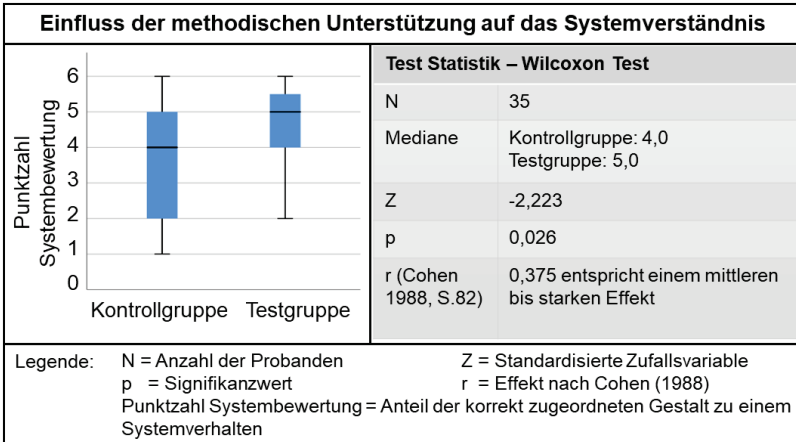


Abbildung 6-8: Analyse des Einflusses der Modellbildungsmethode auf die Punktzahl bei der Systembewertung (Grauberger et al. 2022)

Auf der linken Seite von Abbildung 6-8 ist ein Boxplot der Datenverteilung dargestellt. Auf der rechten Seite sind die Ergebnisse des Wilcoxon-Tests für die 35 zugehörigen Stichproben zum Einfluss der Modellierungsmethode dargestellt. Beim Vergleich von Kontroll- und Testgruppe zeigt der Wilcoxon-Test einen signifikanten Unterschied mit einem mittleren bis starken Effekt *r* nach Cohen (1988). Dies zeigt eine Steigerung des Systemverständnisses auf der Systemebene im Vergleich zu den intuitiven Ansätzen in der Kontrollgruppe und deutet somit auf die Bestätigung der Teilhypothese *H1* hin.

In einer detaillierteren Analyse wird untersucht, welchen Einfluss die Modellbildungsmethode auf das Systemverständnis der einzelnen Systeme hat. Dazu wird eine separate Betrachtung der zwei Systeme Rasthakenverbindung und Kartuschenpresse vorgenommen. Dabei wird jeweils die Hälfte der Daten als unabhängige Stichprobe verwendet, da die Kontroll- und Testgruppe aus der anderen Hälfte der Teilnehmer bestand. Die Kontrollgruppe der Rasthakenverbindung ist also die Testgruppe der Kartuschenpresse und umgekehrt. Abbildung 6-9 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse differenziert nach den beiden Systemen.

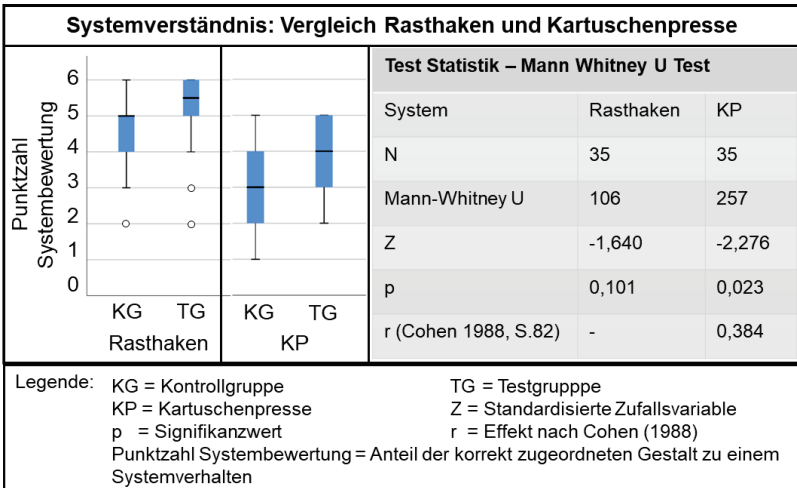


Abbildung 6-9: Analyse einer detaillierten Betrachtung jedes Systems auf seine Punktzahl in der Systembewertung (Veränderung des Systemverständnisses) (Grauberger et al. 2022)

Die Veränderung des Systemverständnisses der Rasthakenverbindung zeigt im Boxplot einen Trend, der jedoch im Mann Whitney U-Test nicht signifikant ist. Die Werte des gemessenen Systemverständnisses liegen sowohl in der Kontroll- als auch in der Testgruppe im oberen Bereich der Messskala. Bei der Kartuschenpresse zeigt die Zunahme des Systemverständnisses einen signifikanten Unterschied mit mittlerem bis starkem Effekt r nach Cohen (1988). Zusammenfassend ist eine Zunahme des Systemverständnisses in beiden Systemen vorhanden, daher wird die Teilhypothese H1 als bestätigt angesehen. Die Ergebnisse der Aufgabe zur Rasthakenverbindung liegen sowohl bei der Kontroll- als auch bei der Testgruppe am oberen Ende der Bewertungsskala, was darauf hindeutet, dass eine leichte Erhöhung der Aufgabenschwierigkeit möglicherweise zu deutlicheren Ergebnissen geführt hätte.

6.3.2 Untersuchung der Detailebene - funktionsrelevante Zustände und funktionskritische Bereiche

Zur Untersuchung des Systemverständnisses auf der Detailebene wird hier die richtige Auswahl der funktionskritischen Bereiche sowie der funktionsrelevanten Zustände für ein Systemverhalten bewertet. Insgesamt konnten für jedes System 35

Datenpunkte verwendet werden. Gruppe A stellte 17 Teilnehmer für die Kontrollgruppe der Rasthakenverbindung und die Testgruppe der Kartuschenpresse. Gruppe B stellte 18 Teilnehmer für die Kontrollgruppe der Kartuschenpresse und die Testgruppe der Rasthakenverbindung.

Die Ergebnisse der Untersuchung der funktionsrelevanten Zustände sind in Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Übersicht über die Untersuchung der Detailebene hinsichtlich funktionsrelevanter Systemzustände zu Teilhypothese 2 (Grauberger et al. 2022)

Gewählte Kategorie		KRZ	FRZ + KRZ	FRZ	Statistische Analyse		
					Erläuterung	Keine relevanten Zustände identifiziert	Korrekt, aber zu weiter Fokus
Rasthaken- verbindung	Kontroll- gruppe	6	10	1	0,527	0,856	-
	Test- gruppe	5	12	1			
Kartuschen- presse	Kontroll- gruppe	3	11	4	2,392	0,301	-
	Test- gruppe	4	6	7			

Legende: KRZ = nicht relevante Zustände p = Signifikanzwert
 FRZ = Funktionsrelevante Zustände r = Effekt nach Cohen (1988)

Die Rohdaten zeigen, dass etwa 3/4 der Teilnehmer in beiden technischen Systemen (FRZ und FRZ+KRZ) die relevanten Zustände ausgewählt haben. Bei der Rasthakenverbindung wählten fast alle Teilnehmer zusätzlich nicht relevante Zustände (KRZ). In den Rohdaten ist kein Trend zwischen den Ergebnissen der Kontroll- und der Testgruppe zu erkennen. Bei der Kartuschenpresse gibt es einen Anstieg der Teilnehmer, die nur relevante Zustände ausgewählt haben (7 in der Testgruppe im Vergleich zu 4 in der Kontrollgruppe). Für die statistische Auswertung wird der exakte Fisher-Test gewählt, da hier eine Randbedingung (<5 Datenpunkte pro Zelle) des Pearson-Chi²-Tests verletzt wird. Beide Systeme zeigen keinen statistisch signifikanten Einfluss der Modellbildungsmethode auf das Systemverständnis

($p > 0,05$). Daraus folgt, dass die Teilhypothese H2 aus den vorhandenen Daten nicht bestätigt werden kann.

Die Verteilung der Ergebnisse für die Untersuchung der funktionskritischen Bereiche ist in Tabelle 6-2 dargestellt.

Tabelle 6-2: Übersicht über die Untersuchung des Detaillierungsgrades bezüglich funktionskritischer Bereiche zu Teilhypothese 3 (Grauberger et al. 2022)

Gewählte Kategorie		Beliebig + RS	Nur FB	FB und FK	Nur FK	Statistische Analyse		
Erläuterung		Unzureichendes Systemverständnis	Fehlende kritische Bereiche	Korrekt, aber Fokus zu weit	Korrekte Lösung	Exakter Fisher-Test	p	r (Cohen 1988)
Rasthaken- verbindung	Kontroll- gruppe	0	0	5	12	5,590	0,082	-
	Test- gruppe	2	1	9	6			
Kartuschen- presse	Kontroll- gruppe	5	13	0	0	2,824	0,241	-
	Test- gruppe	2	13	0	2			

Legende: RS = Reststruktur

FK = Funktionskritische Bereiche

r = Effekt nach Cohen (1988)

FB = funktionsbeteiligte Bereiche

p = Signifikanzwert

= Mehrheitlich korrekte Antworten (Rasthakenverbindung)

= Mehrheitlich nicht korrekte Antworten (Kartuschenpresse)

Die Rohdaten zeigen, dass das Verständnis der funktionskritischen Bereiche bei der Rasthakenverbindung höher ist, mit einer leichten Abnahme von der Kontroll- zur Testgruppe (Zeile 1 und 2, grünes Rechteck). Die Kartuschenpresse als das kompliziertere System hat deutlich mehr funktionsbeteiligte und -kritische Bereiche. Hier wählte fast kein Teilnehmer die richtige Lösung und in den meisten Fällen wurden auch kritische Elemente übersehen (Reihe 3 und 4, rotes Rechteck). Auf eine gemeinsame Auswertung wird verzichtet, da die Ergebnisse so stark variieren, dass die Vergleichbarkeit der Systeme nicht gegeben ist.

Bei der statistischen Auswertung wird der exakte Fisher-Test gewählt, da ebenfalls eine Randbedingung (mehr als 5 Datenpunkte pro Zelle) des Pearson-Chi²-Tests

verletzt wird. Hier zeigen beide Systeme keinen statistisch signifikanten Effekt der Modellbildungsmethode auf das Systemverständnis auf der Detailebene der funktionskritischen Bereiche. Daraus folgt, dass die Teilhypothese H3 aus den vorhandenen Daten ebenfalls nicht bestätigt werden kann.

6.4 Diskussion der Validierungsstudie

Die übergeordnete Forschungshypothese der Validierungsstudie „*Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz unterstützt den Aufbau von qualitativem Systemverständnis*“ wird durch die untersuchten Teilthesen teilweise bestätigt. Die Ergebnisse zur Teilhypothese H1 zeigen, dass die Anwendung der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes das Systemverständnis auf der Systemebene statistisch signifikant erhöht. Die Ergebnisse zu den Teilthesen H2 und H3 zeigen keinen statistisch signifikanten Effekt auf die Identifikation von funktionskritischen Bereichen und funktionsrelevanten Systemzuständen.

Diese Ergebnisse erweitern die Erkenntnisse zum Einfluss der Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes auf das Systemverständnis in der Gestaltung. Bislang war bekannt, dass die Verwendung von bereits vorhandenen C&C²-Modellen das Systemverständnis unterstützt (Gladysz und Albers 2018b). Die Verwendung von bereits aufgebauten Modellen ist jedoch nur eine der Anwendungen von qualitativen Modellen in der Gestaltung. Mit dieser Untersuchung konnte der positive Einfluss der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz auf das Systemverständnis im Vergleich zu intuitiven Ansätzen gezeigt werden. Das bedeutet, dass die in der Grundlagenschulung vermittelte Modellbildungsmethode des C&C²-Ansatzes zumindest auf der Systemebene zu einem erhöhten Systemverständnis führt, auch wenn die Modellersteller keine Experten im Umgang mit dem C&C²-Ansatz sind.

Bei dem gewählten Studiendesign können Ordnungseffekte auftreten. Allen TeilnehmerInnen wird zuerst der Aufgabe der Kontrollgruppe und anschließend die Aufgabe der Testgruppe zugewiesen. Die Annahme eines geringen Einflusses basiert darauf, dass das Gelernte aus der Kontrollgruppenaufgabe keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Testgruppe hat. Die jeweils genutzten Systeme basieren auf unterschiedlichen physikalischen Effekten (Reibkegel der Kartuschenpresse und Kraftverteilung in der Rasthakenverbindung). Die gemeinsame Modellbildung in der Grundlagenschulung fokussiert nochmals andere physikalische Effekte, hier wird kein Systemwissen vermittelt, das zum Verständnis der Kartuschenpresse oder Rasthakenverbindung genutzt werden kann. Da zudem keine Rückmeldung zu den gewählten Ergebnissen erfolgt, wird angenommen, dass die Bearbeitung dieser Aufgaben die Fähigkeit, die andere Aufgabe zu lösen, kaum erhöht. Daher wird der

Einfluss des Lernens als vernachlässigbar angesehen. Es kann jedoch keine sichere Aussage getroffen werden, da hierfür die Replikation des Experiments mit getrennten Kontroll- und Testgruppen benötigt wird.

Für die quantitative Bewertung des Effekts der Grundlagenschulung ist der Vergleich der Modellbildungsmethode mit intuitiven Ansätzen nicht optimal. Hier können in der Kontrollgruppe eine Vielzahl von unbekanntem Ansätzen verwendet werden, von denen einige erfolgreicher sein könnten als andere. Diese Vielfalt erhöht die Streuung der Untersuchungsergebnisse. Besser wäre der Vergleich mit einer bereits etablierten Modellbildungsmethode für den Aufbau von Systemverständnis. Für diese Studie liegt jedoch keine vergleichbare Modellbildungsmethode mit bereits untersuchtem Einfluss auf das Systemverständnis vor. Die Streuung der intuitiven Ansätze wurde deshalb durch die Auswahl der Teilnehmer aus Gruppen mit ähnlicher Ausbildung und Erfahrung begrenzt. Für zukünftige Forschungen kann die in dieser Studie verwendete Modellbildungsmethode als Benchmark (vergleichende Grundlage) verwendet werden, um neue oder verbesserte Modellbildungsmethoden der Gestaltung zu vergleichen.

Der Schwierigkeitsgrad der Beispielsysteme variiert hinsichtlich der Aufgabe auf Systemebene. Die Rasthakenverbindung erreicht die obere Grenze der Messskala und die Daten deuten auf ein allgemein hohes Systemverständnis hin. Dies kann den Effekt der Modellbildungsmethode reduzieren, da bereits die Kontrollgruppe ein recht hohes Systemverständnis erzielte und somit wenig Möglichkeit zur Steigerung vorhanden war. Die Kartuschenpresse als das kompliziertere System erreichte die Grenzen der Messskala nicht, was darauf hindeutet, dass der Schwierigkeitsgrad dieses Systems für eine solche Aufgabe geeignet ist. Um in zukünftigen Untersuchungen auf Systemebene deutlichere Effekte zu erzielen, muss die Systemschwierigkeit der Rasthakenverbindung erhöht werden. Möglichkeiten wären hier beispielsweise die Hinzunahme von zusätzlichen Komponenten (komplizierteres System) oder 3-dimensionale WFP anstatt der aktuell betrachteten 2D-WFP (komplexeres System).

Bei der Detailuntersuchung der funktionskritischen Bereiche scheint die Rasthakenverbindung deutlich einfacher analysierbar zu sein, da fast alle Teilnehmer die kritischen Bereiche identifizierten. In der Testgruppe stieg der Anteil der Teilnehmer, die zusätzliche funktionsbeteiligte Bereiche identifizierten. Dies könnte auf ein „Zerdenken“ des Systems durch die TeilnehmerInnen bei der Identifizierung von Gestaltfunktionselementen (Schritte e) und f) der Modellbildungsmethode) zurückzuführen sein. Dies zeigt eine mögliche Schwäche der Modellbildungsmethode, die weiter untersucht werden sollte. Darüber hinaus lassen sich aus den Ergebnissen Möglichkeiten zur Verbesserung der Messgenauigkeit der Image-Maps ableiten. Die Image-

Map der Rasthakenverbindung enthielt möglicherweise zu wenige Auswahlmöglichkeiten. Zudem war die Reststruktur recht leicht zu erkennen. Dies führte zu sehr hohen Punktzahlen in der Test- und Kontrollgruppe und verwischte mögliche Effekte der Modellbildungsmethode. Hier könnte ein komplizierteres System zu präziseren Untersuchungsergebnissen führen.

Bei der Detailuntersuchung der funktionsrelevanten Zustände identifizierten fast alle TeilnehmerInnen zusätzliche Zustände der Rasthakenverbindung als funktionsrelevant. Dies deutet auf eine geringe Wirksamkeit des Schrittes b) der Modellbildungsmethode hin, in dem die Zustände für die Modellbildung identifiziert werden müssen. Es könnte auch sein, dass die ausgewählten Zustände in ihrer Differenzierung nicht eindeutig waren. Auch hier könnte ein komplizierteres System mit deutlicherer Unterscheidbarkeit der Zustände klarere Ergebnisse unterstützen. Bei der Kartuschenpresse identifizierten in der Testgruppe mehr TeilnehmerInnen das richtige Ergebnis, allerdings war auch die Rate der falschen Antworten erhöht. Dies deutet ebenfalls auf eine geringe Wirksamkeit des Schritts b) der Modellbildungsmethode hin.

6.5 Zusammenfassung der Validierungsstudie

In der Validierungsstudie wurde der Nutzen der Modellbildung von GFZ mit dem C&C²-Ansatz in einer experimentellen Studie mit 35 TeilnehmerInnen und zwei technischen Systemen untersucht. Als Studiendesign wird ein Experiment mit doppelter Nutzung der Probanden verwendet. Hierdurch können kausale Zusammenhänge geprüft werden und Störgrößen wie Erfahrungswissen und Fähigkeiten der TeilnehmerInnen werden reduziert.

Der Nutzen der durch EnhanCE Modelling vermittelten Modellbildungsmethode wird durch eine Veränderung des Systemverständnisses auf zwei unterschiedlichen Detailebenen untersucht. Die Datenerfassung erfolgt digital über die Online-Lernplattform ILIAS des Karlsruher Instituts für Technologie. Eine Auswertung wird durch entsprechend der Datenqualität gewählte statistische Tests durchgeführt.

Es zeigt sich, dass die Modellbildungsmethode das Verständnis der technischen Systeme auf der übergeordneten Systemebene statistisch signifikant erhöht. Auf dieser Ebene wurde gemessen, wie sich ein System bei einer bestimmten Variation seiner konstruktiven Details verhält. Auf der Detailebene wurde gemessen, wann und wo genau konstruktive Details zu dem gezeigten Verhalten führen. Hier konnte kein statistisch signifikanter Effekt festgestellt werden.

In der Untersuchung der Detailebenen zeigt sich Potenzial für weitere Forschung hinsichtlich der Wirksamkeit der Modellbildungsmethode. So werden beispielsweise in der Modellbildungsmethode bislang nur wenige Hilfestellungen gegeben, wie funktionsrelevante Systemzustände identifiziert werden können. Diese Aufgabe gelang den TeilnehmerInnen meist nicht ausreichend.

Im Rahmen dieser Studie wurde eine Vielzahl an C&C²-Modellen durch die TeilnehmerInnen erstellt. Diese Modelle könnten eine vertiefte Analyse des Modellbildungsprozesses und die Identifikation von bislang unbekanntem Schwierigkeiten in den einzelnen Schritten der Modellbildungsmethode unterstützen.

7 Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die in der Beantwortung der drei Forschungsfragen erzielten Forschungsergebnisse dieser Arbeit diskutiert. Hierbei wird auch zusammengefasst, wie das Ziel der Arbeit erreicht wurde. Zudem werden Lücken aufgezeigt, in welchen Potential für weiterführende Forschung besteht.

Zu Forschungsfrage 1: *Wie wird die Modellbildung von GFZ aktuell mit dem C&C²-Ansatz durchgeführt und welche Herausforderungen bestehen dabei?* werden durch Analyse von Publikationen und Projekten folgende Ergebnisse erzielt:

Es werden vier Herausforderungen identifiziert. Die *unzureichende Anwendbarkeit* betrifft als zentrale Herausforderung alle Anwendungsgebiete des C&C²-Ansatzes. Diese Herausforderung zeigt sich in unterschiedlichen Ausprägungen in allen analysierten Publikationen und Projekten. Einerseits zeigt sich, dass die Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz durch Experten möglich ist. Ihr Nutzen beim Verständnis von GFZ wird ebenfalls deutlich. Andererseits wurden kaum Publikationen ohne Beteiligung der Modellentwickler und keine Anwendung durch Laien im Umgang mit dem C&C²-Ansatz identifiziert. In der Projektanalyse zeigt sich zudem, dass selbst Experten im Umgang mit dem C&C²-Ansatz teilweise große Probleme mit seiner zielführenden Anwendung haben.

Die Aufdeckung dieser Herausforderung zeigt, dass qualitative Modelle zum Erkenntnisgewinn in der Gestaltung ähnlich schwierig anwendbar sind wie quantitative Modelle. Für quantitative Modelle ist dies bekannt, beispielsweise benötigen FEM oder Mehrkörpersimulationen (Vajna et al. 2018) eine sehr aufwändige Ausbildung, bis sie zum Erkenntnisgewinn von GFZ im Unternehmensumfeld zielführend nutzbar sind. Hier existiert eine Vielzahl an verschiedenen Anwendungsunterstützungen wie Schulungen, Video-Tutorials oder Studiengänge. Zu qualitativen Modellen existieren meist weder Modellbildungsmethoden noch Anwendungsunterstützungen.

Der C&C²-Ansatz beinhaltet eine Modellbildungsmethode, jedoch zeigt die durchgeführte Analyse, dass allein die Existenz einer Modellbildungsmethode die Anwendbarkeit eines Modells nicht sicherstellt. Diese Methode wurde zudem erst 20 Jahre nach der Entwicklung des C&C²-Ansatzes expliziert. Dies zeigt, dass die Relevanz einer solchen Methoden den Modellentwicklern und Experten im Umgang mit ihm nicht zwangsläufig bewusst ist. In vielen qualitativen Modellbildungsansätzen existiert weiterhin keine explizite Modellbildungsmethode.

Für die Forschung an qualitativen Modellen lässt sich daraus ableiten, dass bei Modellen zum Erkenntnisgewinn der Fokus früh auf die Anwendungsunterstützung gelegt werden muss, um die Anwendbarkeit sicherzustellen. Die Untersuchung von Gladysz und Albers (2018b) zeigt zwar, dass der Nutzen eines Modells auch unabhängig von der Anwendbarkeit nachgewiesen werden kann. Jedoch besteht hier die Einschränkung, dass die Modelle im Vorfeld von Experten aufgebaut und den Probanden zur Verfügung gestellt werden müssen. Hierdurch sind keine Aussagen zum Nutzen des Modells ohne Beteiligung von Experten möglich.

Zusätzliche Herausforderungen in der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatzes wurden in drei weiteren Schwerpunkten identifiziert:

Verknüpfung zu weiteren Modellen der Gestaltung: Mit dem C&C²-Ansatz modellierte Erkenntnisse werden kaum weiterverwendet. Dies kann darin liegen, dass konkrete GFZ immer auf den Parametern in den Kernelementen basieren. Diese Parameter sind aktuell nicht formalisiert und werden häufig nicht in das C&C²-Modell integriert, so dass beispielsweise der Zusammenhang einer aufgestellten Hypothese mit dem C&C²-Modell nur für den Modellersteller erkennbar ist. Eine Formalisierung kann dabei unterstützen, Erkenntnisse der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz an weiterführende Modelle übergeben zu können. Bezüglich dieser Formalisierung ist weiterführende Forschung notwendig, um die Modellverknüpfung im Sinne föderalistischer Ansätze (Kleiner et al. 2017) zu unterstützen.

Überprüfung von Annahmen: Betroffene Annahmen in C&C²-Modellen müssen überprüft werden, um sicherzustellen, dass sie die Realität ausreichend korrekt abbilden. Diese Überprüfung wird häufig erst durch Nutzung von quantitativen Modellen durchgeführt. Für Experten ist es jedoch möglich, diese Überprüfung schon früher durchzuführen (vgl. (Matthiesen 2021, S. 453), was erhebliche Vorteile in der Produktentwicklung bringt. Gelingt dies jedoch nicht, können aufwendige Iterationen (Meboldt et al. 2012) durch späte Falsifizierung von Annahmen auftreten. Eine initiale methodische Unterstützung hierzu besteht durch die Konstruktionshypothesen (Matthiesen et al. 2017a).

Modellbildung in komplizierten und komplexen Systemen: Die Modellbildung in Fragestellungen des Unternehmensumfelds ist aufgrund der Kompliziertheit (viele Komponenten und Schnittstellen) oder auch Komplexität (stochastisches Systemverhalten) mit dem C&C²-Ansatz häufig schwierig. Dadurch ist seine Anwendbarkeit in der Gestaltung auch für Experten eingeschränkt. Es ist zwar prinzipiell möglich, konstruktive Fragestellungen der Gestaltung soweit einzugrenzen, dass sie mit wenigen C&C²-Modellen beschreibbar sind. Die Modellbildung während dieser Eingrenzung ist jedoch ebenfalls wichtig, um nachvollziehen zu können, warum und wie

die final relevanten Modelle entstanden sind. In der Eingrenzung entstehen viele Modelle, in denen getroffenen Annahmen und das dabei generierte Wissen dokumentiert ist. Um diese Herausforderung zu adressieren, wurde bereits eine initiale Studie zu einer Struktur des C&C²-Sequenzmodell durchgeführt (Matthiesen et al. 2019b). Hier ist jedoch weiterer Forschungsbedarf notwendig, um eine anwendbare und leicht verständliche Datenstruktur zu entwickeln.

Zusammenfassend stehen durch diese Analyse Erkenntnisse zu vorhandenen Publikationen und Projekten mit Anwendung des C&C²-Ansatzes, identifizierten Herausforderungen und Forschungspotentialen zur Weiterentwicklung zur Verfügung. Diese Analyse kann auch in der Forschung zu anderen, bereits etablierten Modellbildungsansätze für die Gestaltung genutzt werden. Beispielsweise könnten Anwendungen des CPM (Weber 2005, 2014) untersucht werden, um die in der illustrative Studie von Erbe (2018) getroffenen Aussagen der ebenfalls seltenen Anwendung zu detaillieren und dadurch Weiterentwicklungspotential zu identifizieren.

In der Forschung zu (relativ) neu entwickelten Modellen wie beispielsweise dem Wirkraummodell (Beetz et al. 2017) oder dem Lastpfad und Knotenmodell (Vogel 2021) kann die durchgeführte Projektanalyse (vgl. Kapitel 4.3) unterstützen. So können Erkenntnisse der Modellanwender strukturiert aufbereitet werden und sind in der Evaluation und Weiterentwicklung nutzbar.

An die zentrale Herausforderung als Kernergebnis zur Forschungsfrage 1 schließt die Beantwortung der Forschungsfrage 2 *Wie kann die Modellbildung von GFZ auf Basis des C&C²-A methodisch unterstützt werden, um die gefundenen Herausforderungen zu überwinden?* an:

Als methodische Unterstützung der Modellbildung von GFZ auf Basis des C&C²-Ansatzes wurde das EnhanCE Modelling entwickelt. Als Methodenschulung beinhaltet es drei Schulungsvarianten, mit denen der C&C²-Ansatz in unterschiedlicher Tiefe vermittelt wird und erforscht werden kann. Mit EnhanCE Modelling wird es auch ohne Vorkenntnisse möglich, den C&C²-Ansatz zu nutzen, um Erkenntnisse zu GFZ zu gewinnen und in einem Modell zu dokumentieren.

Im EnhanCE Modelling kommt der Modellbildungsmethode eine entscheidende Rolle zu, da durch sie die Modellbildung in handhabbare und messbare Schritte zerlegt und vermittelbar wird. Die Unterstützung der Anwendbarkeit durch das EnhanCE Modelling zeigt hier auf, wie wichtig eine explizite Modellbildungsmethode für die erfolgreiche Vermittlung eines Modellbildungsansatzes ist.

Die Nutzung von Erkenntnissen der Bildungsforschung ermöglichte die Optimierung der initialen Schulung des EnhanCE Modelling. Die Explizierung und Anpassung

von Lernzielen durch das Constructive Alignment (Biggs 1996) und die Berücksichtigung der kognitiven Niveaustufen durch die Bloom'sche Taxonomie (Bloom 1956) unterstützten die Ableitung der drei Varianten für die kontextspezifische Vermittlung des C&C²-Ansatzes. Ein ähnliches (aber deutlich umfangreicheres) Konzept von Schulungsvarianten ist beispielsweise im Rahmen des Six Sigma als Methode des Qualitätsmanagements etabliert (Schroeder et al. 2008). Die Nutzung der Erkenntnisse aus der Hattie-Studie (Hattie 2010) ermöglichte die Optimierung in den Details des Schulungsablaufs.

Die Anwendbarkeit der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz konnte durch das EnhanCE Modelling erstmalig untersucht werden. Hierbei zeigten sich Herausforderungen der Modellbildung, die durch die bisherigen Fallstudien mit Experten im Umgang mit dem C&C²-Ansatz nicht aufgedeckt werden konnten. Beispielsweise wurde das Finden einer Visualisierung als Basis für das C&C²-Modell als Herausforderung der Anwendbarkeit identifiziert. Eine Beobachtbarkeit der Modellbildung zeigt sich damit als entscheidend für die Untersuchung eines Modells. Durch sie wird sichergestellt, dass die TeilnehmerInnen das Modell auch so bilden, wie es in der Modellentwicklung vorhergedacht wurde.

Auf Basis des EnhanCE Modelling kann nun der Einfluss der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz auf den Aufbau von Systemverständnis untersucht werden. Der Aufbau von Systemverständnis ist dabei der Nutzen, den der C&C²-Ansatz in der Gestaltung haben soll. Die Forschungsfrage 3: *Welchen Einfluss hat die entwickelte methodische Unterstützung auf den Nutzen des C&C²-Ansatzes in der Modellbildung von GFZ?* wird durch eine experimentelle Studie untersucht.

Um den Einfluss der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz auf das Systemverständnis in der Gestaltung zu prüfen, wurde ein experimentelles Studiendesign entwickelt. Hier wurde die Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling als Stimulus der Studie verwendet. Mit dem ausgearbeiteten Studiendesign kann der Einfluss dieser Schulungsvariante des EnhanCE Modelling auf das Systemverständnis der TeilnehmerInnen experimentell untersucht werden. Die im Rahmen dieser experimentellen Studie aufgestellten Hypothesen werden im Detail in Kapitel 6.4 diskutiert.

Die übergeordnete Bedeutung der Ergebnisse für die Forschungsfrage 3 liegt in drei Bereichen vor:

Belastbares Ergebnis zum Nutzen des C&C²-Ansatzes: Es zeigte sich, dass das Systemverständnis der TeilnehmerInnen durch die methodisch unterstützte Modellbildung des GFZ auf einer der drei untersuchten Ebenen der Systembetrachtung

stieg. Damit ist nachgewiesen, dass nicht nur die Nutzung eines von Experten erstellten C&C²-Modells, sondern auch die Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz durch Novizen einen Nutzen bezogen auf das Systemverständnis in der Gestaltung hat.

Unerwartete Ergebnisse – Relevanz der experimentellen Studie: Die Relevanz einer experimentellen Untersuchung für die Aufdeckung von Forschungspotential zeigt sich deutlich in den Ergebnissen zu den Ebenen der Detailbetrachtung. Das C&C²-Sequenzmodell zur Zustandsmodellierung war eine der ersten Erweiterungen des C&C²-Ansatzes (Albers et al. 2008a). Seitdem wird es durch Experten sehr erfolgreich in vielen Projekten im Unternehmensumfeld eingesetzt (vgl. auch Kapitel 2.4.3). Die Zustandsbetrachtung ist nach Erfahrung des Autors in Diskussionen zum C&C²-Ansatz erfahrungsgemäß das eingängigste und von seinem Nutzen her am schnellsten zu begreifende Element des C&C²-Ansatzes. Eine Herausforderung in der Anwendbarkeit der Zustandsmodellierung wurde in der Untersuchung des EnhanCE Modelling nicht erwartet und auch nicht identifiziert. Allerdings zeigten sich hier bereits Verhaltensweisen, welche den Nutzen einschränken, beispielsweise die Wahl eines zu weiten Fokus der Analyse oder die Betrachtung nicht relevanter Zustände. Erst die statistische Auswertung zeigte, dass die Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling aktuell das C&C²-Sequenzmodell nicht ausreichend vermittelt, um Novizen die erfolgreiche Vorgehensweise von Experten in der Zustandsmodellierung nahezubringen.

Pionierstudie als Referenz für Modellforschung in der Gestaltung: Durch die Validierungsstudie dieser Forschungsarbeit besteht erstmalig eine experimentelle Untersuchung einer qualitativen Modellbildungsmethode. Diese Studie wurde auf den C&C²-Ansatz zugeschnitten, beinhaltet aber viele Elemente, die mit geringem Aufwand adaptiert werden können. Beispielsweise können Erfolgskriterien und deren Operationalisierung ersetzt werden oder die Grundlagenschulung auf ein anderes Modell angepasst werden, ohne den grundlegenden Studienaufbau anpassen zu müssen. Dadurch kann sie als Referenz in der Weiter- und Neuentwicklung von qualitativen Modellen für die Gestaltung genutzt werden. Dies wurde im Rahmen der Entwicklung des Lastpfad und Knotenmodells bereits genutzt (Vogel 2021).

Das Ziel dieser Forschungsarbeit kann dadurch zusammenfassend in den folgenden Aspekten als erreicht betrachtet werden:

- Das EnhanCE Modelling als Methodenschulung ermöglicht das Erlernen der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz angepasst auf unterschiedliche Kontexte.
- Die Anwendbarkeit der Modellbildungsmethode zum C&C²-Ansatz konnte in zwei Varianten der Schulungen untersucht und verbessert werden.

- Mit der Variante der Grundlagenschulung konnte die methodische Unterstützung der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz experimentell untersucht werden. Der Nutzen der durch EnhanCE Modelling unterstützten Anwendung des C&C²-Ansatzes auf das Systemverständnis der TeilnehmerInnen konnte auf der übergeordneten Systemebene nachgewiesen werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von EnhanCE Modelling¹ als Methodenschulung zur Vermittlung und Erforschung der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz. Als Basis der Entwicklung dient eine Analyse von Anwendungen des C&C²-Ansatzes und der darin bestehenden Herausforderungen. Es werden vier Herausforderungen identifiziert, wobei die unzureichende Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes als zentrale Herausforderung im weiteren Verlauf der Arbeit adressiert wird. Die drei weiteren Herausforderungen liegen in der Verknüpfung des C&C²-Ansatzes zu weiteren Modellen der Gestaltung, der Überprüfung von Annahmen in C&C²-Modellen und der Modellbildung in komplizierten und komplexen Systemen.

Um die zentrale Herausforderung der unzureichenden Anwendbarkeit zu adressieren, wird das EnhanCE Modelling als Methodenschulung zur Vermittlung und Erforschung der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz entwickelt. Es beinhaltet drei kontextspezifischen Schulungen zum C&C²-Ansatz. Die Grundlagenschulung vermittelt in kurzer Zeit das Basiswissen zum C&C²-Ansatz und ermöglicht eine erste Modellbildung. Die Anwendungsschulung erweitert die Grundlagenschulung um praktische Modellbildungsteile. Die Syntheseschulung beinhaltet neben dem C&C²-Ansatz weitere Methoden zum Erkenntnisgewinn in der Gestaltung und vertieft die Vermittlung durch Anwendung in Fragestellungen aus dem beruflichen Alltag der TeilnehmerInnen.

In der Entwicklung des EnhanCE Modelling werden Modelle und Erkenntnisse der Bildungsforschung genutzt. Eine zum Abschluss der Entwicklung durchgeführte Untersuchung der Anwendbarkeit des C&C²-Ansatzes in der Grundlagen- und Anwendungsschulung zeigt, dass der C&C²-Ansatz durch EnhanCE Modelling auch ohne Vorkenntnisse zur Modellbildung von GFZ genutzt werden kann. Damit wird seine Anwendung zum Aufbau von Systemverständnis einer größeren Zielgruppe möglich. Zudem werden nun erstmalig experimentelle Untersuchungen der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz möglich.

¹ EnhanCE Modelling = Engineering training with hands on method application in Context specific Early Modelling – zu Deutsch: Schulung für Ingenieure mit praktischer Methodenanwendung in kontextspezifischer früh einsetzbarer Modellbildung

Zum Abschluss dieser Arbeit wird der Einfluss des durch EnhanCE Modelling vermittelten C&C²-Ansatzes auf das Systemverständnis in Fragestellungen der Gestaltung experimentell geprüft. Bislang war es nur möglich, den Einfluss bereits bestehender C&C²-Modelle zu untersuchen. Hierbei zeigt sich ein statistisch signifikanter Effekt der Vermittlung der Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz durch die Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling auf das Systemverständnis der TeilnehmerInnen. Mit diesem Experiment werden erstmalig statistisch signifikante Aussagen zum Einfluss der Modellbildung von GFZ mit dem C&C²-Ansatz auf das Systemverständnis von ProduktentwicklerInnen möglich.

In dieser Forschungsarbeit wurde im Rahmen der durchgeführten Studien weiterer Forschungsbedarf aufgedeckt. Dieser wird im Folgenden zusammengeführt:

Experimentelle Validierung: Zu vielen Erweiterungen und Methoden im C&C²-Ansatz wurden bislang nur entwicklungsbegleitende Studien niedriger Evidenzstufen durchgeführt. Diese sind notwendig, um initiale Erkenntnisse zu gewinnen, ersetzen jedoch nicht die anschließende Validierung. Durch den Aufbau der Untersuchungs-umgebung und die experimentelle Untersuchung des C&C²-Ansatzes durch die Grundlagenschulung des EnhanCE Modelling ist es möglich, nun auch weitere Elemente des C&C²-Ansatzes experimentell zu untersuchen. Die durchgeführten Untersuchungen zur Anwendbarkeit und zum Nutzen können dabei als Referenz dienen, gegen die zukünftige Weiterentwicklungen im C&C²-Ansatz gemessen werden. Zudem können auch Methoden wie beispielsweise die Konstruktionshypothese in einer ähnlichen Studie untersucht werden, um belastbare Erkenntnisse zu ihren Erfolgskriterien zu gewinnen.

Durch die Integration von Forschungsmöglichkeiten in das EnhanCE Modelling kann es genutzt werden, um auch weitere Modelle und Modellbildungsmethoden der Gestaltung zu prüfen. Damit liegt ein initialer „Methodenprüfstand“ vor, der in der Forschungsgemeinschaft genutzt werden kann, um die Entwicklung von Modellen und Modellbildungsmethoden durch belastbare Erkenntnisse zu unterstützen. Hierdurch kann die aufgrund des noch relativ jungen Forschungsgebiets der Methodenforschung vorliegende Hürde zur Durchführung experimenteller Studien gesenkt werden. Langfristig werden so belastbarere Erkenntnisse höherer Evidenzstufen, beispielsweise aus Meta-Analysen der vorliegenden Experimente, möglich.

Ausbau des Modellföderalismus: Verglichen mit anderen qualitativen Modellen zum Erkenntnisgewinn besitzt der C&C²-Ansatz einen relativ breiten Anwendungsbereich. Dadurch besteht Potential, ihn zum zentralen Element eines Modellföderalismus zur Unterstützung der Gestaltung weiterzuentwickeln. Hier ist die Entwicklung einer übergeordneten Struktur für Modelle des GFZ und Untersuchung von

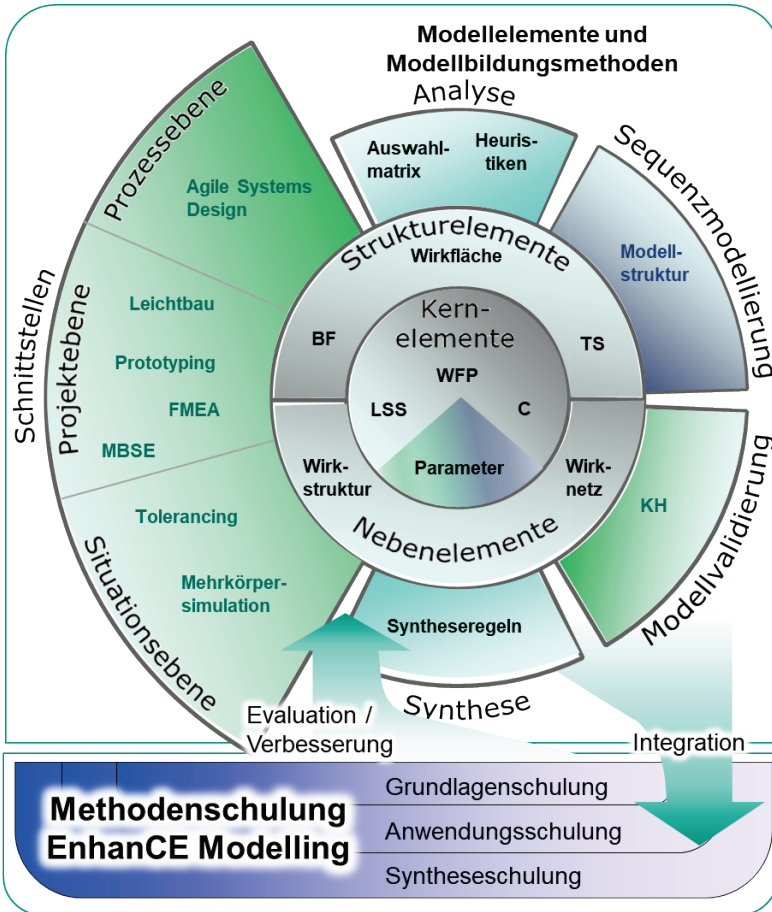
Schnittstellen der verschiedenen Modelle notwendig. So können bereits bestehende Inzellösungen in die Modelllandschaft integriert und Synergien zwischen potentiell kompatiblen Modellen gehoben werden.

Rechnerunterstützte qualitative GFZ-Modellbildung: Im C&C²-Sequenzmodell existiert eine Struktur für die einzelnen C&C²-Modelle, durch die Systemzustände abbildbar sind. In Kombination mit einer formalisierten Modellierung der Parameter bietet sie die Möglichkeit einer Rechnerunterstützung der Modellbildung. Mit einer Umsetzung des C&C²-Ansatzes in ein Software-Tool kann die Anwendbarkeit in komplizierten Systemen unterstützt werden. Hier besteht Forschungsbedarf darin, die Modellbildung soweit zu unterstützen, dass sie nach Durchführung der Syntheseschulung selbständig durchgeführt werden kann. Dazu müssen Elemente dieser Schulung detaillierter evaluiert und auf ihre Wirksamkeit geprüft werden. Zudem darf die Rechnerunterstützung die Flexibilität der Modellbildung nicht einschränken, da dies der zentrale Vorteil des C&C²-Ansatzes verglichen mit stärker formalisierten Modellen ist.

Unterstützung in der Modellbildung und -nutzung: In dieser Forschungsarbeit wurde ausschließlich die Modellbildung in der Analyse betrachtet, da der Gewinn von Erkenntnissen zu GFZ als Modellzweck im Fokus stand. In der retrospektiven Projektanalyse wurde eine Vielzahl an zusätzlichen Analysemethoden und -modellen genutzt, um geeignete Systemabbilder zu erzeugen (vgl. Kapitel 4.3.2). Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde hierzu bereits eine Auswahlmatrix als Hilfsmittel entwickelt (Hoelz et al. 2020). In der Untersuchung der Anwendbarkeit (vgl. Kapitel 5.8) wurde die Erstellung geeigneter Systemabbilder als Herausforderung identifiziert. Daraus ergibt sich weiterer Forschungsbedarf in der Unterstützung der Erstellung einer geeigneten Systemvisualisierung.

Mit dem C&C²-Ansatz kann jedoch auch die Umsetzung neuer Konstruktionen in der Synthese unterstützt werden. Forschungsbedarf besteht in der Untersuchung der Modellbildungsmethode für die Synthese (vgl. Kapitel 2.5.3). Auch die Einbindung von Gestaltungsprinzipien und -richtlinien in die Nutzung der drei grundlegenden Syntheseprinzipien des C&C²-Ansatzes kann weiter erforscht werden. Eine mögliche Forschungsrichtung ist die Unterstützung bei der Übertragung der eher abstrakt gehaltenen Gestaltungsprinzipien in konkrete Fragestellungen in Entwicklungsaufgaben.

Eine Übersicht der Forschungspotentiale im C&C²-Ansatz ist in Abbildung 8-1 dargestellt.



Forschungspotential	Legende
Grundlegendes Element	WFP = Wirkflächenpaar
Rechnerunterstützung	LSS = Leitstützstruktur
Schnittstellentwicklung	TS = Tragstruktur
Modellbildung und -nutzung	C = Connector
	KH = Konstruktionshypothesen
	MBSE = Model-based Systems Engineering
	FMEA = Failure Mode and Effects Analysis
	EnhanceCE = Engineering training with hands on method application in Context specific Early Modelling – zu Deutsch: Schulung für Ingenieure mit praktischer Methodenanwendung in kontextspezifischer früh einsetzbarer Modellbildung

Abbildung 8-1: Forschungspotentiale im C&C²-Ansatz

Hier sind die Elemente und Methoden des C&C²-Ansatzes dargestellt. Zentral sind die Kernelemente WFP, LSS und Connector inklusive der in ihnen enthaltenen Parameter abgebildet. Die Parameter sind dabei ein zentrales Element sowohl für die Entwicklung von Schnittstellen als auch in der Rechnerunterstützung. Um die Kernelemente herum befinden sich die Struktur- und Nebenelemente. In ihnen wurde kein spezifisches Forschungspotential identifiziert.

Darum sind die Modellbildungsaktivitäten Analyse, Sequenzmodellierung, Modellvalidierung und Synthese dargestellt. In Analyse und Synthese besteht Potential zur weiteren Forschung in der Modellbildung und -nutzung. Speziell zur Synthese liegen noch sehr wenig Forschungsarbeiten vor. Die Struktur der Sequenzmodellierung bildet die Basis zur Umsetzung einer Rechnerunterstützung. Die Konstruktionshypothesen zur Modellvalidierung können in der Schnittstellenentwicklung unterstützen, indem Modelle durch sie miteinander verknüpft werden können. Die bereits bestehenden Schnittstellen zu weiteren Modellen und Methoden sind in Abbildung 8-1 links dargestellt. Diese werden nach ihrem Fokus in Prozess-, Projekt- und Situationsebene unterteilt, um dem jeweils notwendigen Abstraktionsgrad gerecht zu werden (vgl. auch Meißner et al. (2005)).

Auf der Situationsebene bietet es sich an, zwei bereits angelegten Forschungsarbeiten zum Tolerancing (Grauberger et al. 2020b) und der Mehrkörpersimulation (Matthiesen et al. 2018c; Wettstein et al. 2021) weiterzuverfolgen, um die Verknüpfung zu weiteren Modellen zu intensivieren. Hier können beispielsweise geeignete Formen der C&C²-Modellbildung entwickelt und untersucht werden, welche das Verständnis der GFZ in Mehrkörpersimulationen unterstützen.

Auf der Projektebene wurden bereits Fallstudien zur Unterstützung im Leichtbau (Albers et al. 2019b) und der Nutzung von Rapid-Prototyping-Verfahren (Matthiesen et al. 2020) durchgeführt. Hier besteht weiteres Forschungspotential darin, die entwickelten Methoden projektspezifisch auszubauen. Beispielsweise können weitere Rapid-Prototyping-Verfahren für den effizienten Erkenntnisgewinn in die Methode integriert werden oder weitere Leichtbauprinzipien unterstützt werden. Hier bietet sich zudem an, eine Übersicht von Potentialen zu projektspezifischen Fragestellungen zu erforschen, in der ein Methodenportfolio auf Basis des C&C²-Ansatzes für spezifische Projekttypen entwickelt werden kann. Hier können dann auch zusätzliche ähnliche Modelle wie das Wirkraummodell integriert werden.

Auf der Prozessebene wurde bereits eine Fallstudie zur Verknüpfung des C&C²-Ansatzes mit dem agilen Prozessmodell ASD – Agile Systems Design durchgeführt (Grauberger et al. 2020c). Hierbei wurde initial das Unterstützungspotential des

C&C²-Ansatzes in der agilen Produktentwicklung geprüft. Forschungspotential bietet sich hier bezogen auf die Unterstützung der schlanken Modellbildung und einfachen Kommunikation im Entwicklungsteam.

Zu den genannten Forschungspotentialen im C&C²-Ansatz dient EnhanCE Modelling als Validierungsumgebung, in welche die entwickelten Elemente integriert werden können. Ähnlich zu den Ergebnissen in Kapitel 5.8 und 6.3 können so Anwendbarkeit und Nutzen der entwickelten Elementen erhoben werden, welche die weitere Forschung unterstützen.

Literaturverzeichnis

- Alavi, M. & Leidner, D. E. (2001). Review: Knowledge Management and Knowledge Management Systems: Conceptual Foundations and Research Issues. *MIS Quarterly* 25 (1), 107–136. doi:10.2307/3250961
- Albers, A. & Alink, T. (2007). Support of Design Engineering Activity for a Systematic Improvement of Products. In *The Future of Product Development*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Albers, A., Alink, T., Matthiesen, S. & Thau, S. (2008a). Support of System Analyses and Improvement in Industrial Design through the Contact & Channel Model. In *10th International Design Conference, DESIGN 2008* (S. 245–252). Dubrovnik, Kroatien.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016a). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 541–569). München: Hanser.
- Albers, A., Braun, A., Clarkson, J., Enkler, H.-G. & Wynn, D. (2009). Contact and Channel Modelling to support early design of technical systems. In *International Conference on Engineering Design ICED 09* (S. 61–72). Stanford, CA, USA.
- Albers, A., Braun, A., Sadowski, E., Wyatt, D. F., Wynn, D. C. & Clarkson, P. J. (2010). Contact and Channel Modelling Using Part and Function Libraries in a Function-Based Design Approach. In *22nd International Conference on Design Theory and Methodology; Special Conference on Mechanical Vibration and Noise* (S. 393–404). Montreal, Kanada: ASME.
- Albers, A., Braun, A., Sadowski, E., Wynn, D. C., Wyatt, D. F. & John Clarkson, P. (2011a). System Architecture Modeling in a Software Tool Based on the Contact and Channel Approach (C&C-A). *Journal of Mechanical Design* 133 (10), 147. doi:10.1115/1.4004971
- Albers, A., Burkardt, N., Matthiesen, S. & Ohmer, M. (2005). *C&CM - ein konstruktionsmethodisches Denkmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme*. IPEK - Institut für Produktentwicklung, Technische Universität Karlsruhe (1–12). Zugriffen: 14. April 2022. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000004259>. doi: 10.5445/IR/1000004259.

- Albers, A., Burkardt, N. & Ohmer, M. (2004a). Principles for Design on the Abstract Level of the Contact & Channel Model C&CM. In *Tools and Methods of Competitive Engineering, Proceedings of the TMCE 2004 Symposium* (S. 87–94). Lausanne, Schweiz.
- Albers, A., Bursac, N., Eckert, C., Walter, B., Wilmsen, M. & Heimicke, J. (2018). Agile Method Development: A Live-Lab Case Study on Product Properties for Process Planning. In *15th International Design 2018 DESIGN 2018* (S. 713–724). Dubrovnik, Kroatien.
- Albers, A., Deigendesch, T. & Alink, T. (2008b). Support of Design Engineering Activity - The Contact and Channel Model (C&CM) in the Context of Problem Solving and the Role of Modelling. In *10th International Design Conference, DESIGN 2008* (S. 97–102). Dubrovnik, Kroatien.
- Albers, A., Denda, C., Sprigade, S. & Lorentz, B. (2014). Reduction of Torque Oscillations in Wet Running Clutch. In *Fédération Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile - FISITA World Automotive Congress* (S. 3954–3962). Maastricht, Niederlande.
- Albers, A., Enkler, H. G. & Ottndad, J. (2011b). Managing complex simulation processes: the generalised contact and channel model. *International Journal of Product Development* 13 (3), 204. doi:10.1504/IJPD.2011.040267
- Albers, A., Gladysz, B., Kniel, J., Aschoff, M. & Meyer, A. (2016b). Integration von Versuchsergebnissen in C&C²-Modellen zur Wiederverwendung in der Produktgenerationsentwicklung am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems. In *14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik* (S. 10–20). Aachen: Shaker Verlag.
- Albers, A., Heimicke, J., Spadinger, M., Reiss, N., Breitschuh, J., Richter, T., Bursac, N. & Marthaler, F. (2019a). A systematic approach to situation-adequate mechatronic system development by ASD - Agile Systems Design. *Procedia CIRP* 84, 1015–1022. doi:10.1016/j.procir.2019.03.312
- Albers, A., Martin, P. & Lorentz, B. (2011c). Modeling and Design of Contacts in electrical Connectors. In *International Conference on Engineering Design, ICED11* (S. 268–277). Lyngby/Copenhagen, Dänemark.
- Albers, A. & Matthiesen, S. (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme. *Konstruktion* 54 (7-8), 55–60.
- Albers, A., Matthiesen, S. & Ohmer, M. (2004b). Evaluation of the Element Model “Working Surface Pairs & Channel and Support Structures”. In S. Tichkiewitch

- & D. Brissaud (Hrsg.), *Methods and Tools for Co-operative and Integrated Design* (S. 353–362). Dordrecht: Springer Niederlande.
- Albers, A., Matthiesen, S., Revfi, S., Schönhoff, C., Grauberger, P. & Heimicke, J. (2019b). Agile Lightweight Design - The Extended Target Weighing Approach in ASD - Agile Systems Design Using Functional Modelling with the C&C 2 - Approach. In *22nd International Conference on Engineering Design ICED19* (S. 2667–2676). Delft, Niederlande.
- Albers, A., Matthiesen, S., Thau, S. & Alink, T. (2008c). Support of Design Engineering Activity Through C&CM - Temporal Decomposition of Design Problems. In I. Horváth & Z. Rusak (Hrsg.), *Proceedings of the TMCE 2008* (S. 295–306). Izmir, Türkei.
- Albers, A., Ohmer, M. & Eckert, C. (2004c). Engineering design in a different way: cognitive perspective on the contact and channel model approach. In *Proceedings of Third International Conference Visual & Spatial Reasoning in Design* (S. 3–22). Cambridge, USA.
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016c). 15 years of SPALTEN problem solving methodology in product development. In *12th Biennial Nord-design 2016 Conference "Highlighting the Nordic Approach", NordDesign 2016; Norwegian University of Science and Technology (NTNU) Trondheim; Norway*; (S. 411–420). Trondheim, Norway.
- Albers, A., Walch, M. & Bursac, N. (2016d). Entscheidungsunterstützung durch die Variationsanteile der Produktgenerationsentwicklung. *Konstruktion* 68 (7-8), 67–71.
- Albers, A. & Wintergerst, E. (2014). The Contact and Channel Approach (C&C²-A): relating a system's physical structure to its functionality. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* (S. 151–172). Springer London.
- Alink, T. (2010). *Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz*. Dissertationsschrift, Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.
- Ameri, F., Summers, J. D., Mocko, G. M. & Porter, M. (2008). Engineering design complexity: an investigation of methods and measures. *Research in Engineering Design* 19 (2-3), 161–179. 10.1007/s00163-008-0053-2.
- Andreasen, M. M. (1980). *Syntesemetoder på systemgrundlag (synthesis methods based upon system theory)*. PhD Thesis, Lund University. Lund, Schweden.

- Andreasen, M. M., Hansen, C. T. & Cash, P. (2015). *Conceptual Design. Interpretations, Mindset and Models*. Cham, Schweiz: Springer International Publishing.
- Atherton, M., Jiang, P., Harrison, D. & Malizia, A. (2018). Design for invention: annotation of functional geometry interaction for representing novel working principles. *Research in Engineering Design* 29 (2), 245–262. doi:10.1007/s00163-017-0267-2
- Atilola, O., Tomko, M. & Linsey, J. S. (2016). The effects of representation on idea generation and design fixation: A study comparing sketches and function trees. *Design Studies* 42, 110–136. doi:10.1016/j.destud.2015.10.005
- Baxter, D., Gao, J., Case, K., Harding, J., Young, B., Cochrane, S. & Dani, S. (2008). A framework to integrate design knowledge reuse and requirements management in engineering design. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24 (4), 585–593. doi:10.1016/j.rcim.2007.07.010
- Beckmann, G., Gebhardt, N. & Krause, D. (2014). Transfer of Methods for Developing Modular Product Families into Practice – An Interview Study. In *13th International Design Conference DESIGN 2014* (S. 121–130). Dubrovnik, Kroatien.
- Beetz, J.-P. & Kirchner, E. (2019). Das Wirkraummodell – Ein Hilfsmittel bei der Gestaltung sauberkeitsrelevanter Produkte. *Forschung im Ingenieurwesen* 83 (4), 933–946. doi:10.1007/s10010-019-00375-0
- Beetz, J.-P., Schlemmer, P. D., Kloberdanz, H. & Kirchner, E. (2017). New ways of hygienic design - a methodical approach. In *21st International Conference on Engineering Design, ICED17* (S. 81–90). Vancouver, Kanada.
- Beetz, J.-P., Schlemmer, P. D., Kloberdanz, H. & Kirchner, E. (2018). Using the new working space model for the development of hygienic products. In *15th International Design Conference DESIGN 2018* (S. 985–996). Dubrovnik, Kroatien.
- Berselli, G., Meng, Q., Vertechy, R. & Castelli, V. P. (2016). An improved design method for the dimensional synthesis of flexure-based compliant mechanisms: optimization procedure and experimental validation. *Meccanica* 51 (5), 1209–1225. doi:10.1007/s11012-015-0276-z
- Biggs, J. (1996). Enhancing teaching through constructive alignment. *Higher Education* 32 (3), 347–364.

- Bilancia, P., Berselli, G., Bruzzone, L. & Fanghella, P. (2017). A Practical Method for Determining the Pseudo-rigid-body Parameters of Spatial Compliant Mechanisms via CAE Tools. *Procedia Manufacturing* 11, 1709–1717. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.374
- Blessing, L. T.M. & Chakrabarti, A. (Hrsg.). (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer London.
- Bloom, B. S. (1956). *Taxonomy of educational objectives. The classification of educational goals*. New York: McKay.
- Boersting, P., Keller, R., Alink, T., Eckert, C., Albers, A. & Clarkson, P. J. (2008). The relationship between functions and requirements for an improved detection of component linkages. In *10th International Design Conference, DESIGN 2008* (S. 309–316). Dubrovnik, Kroatien.
- Bonev, M., Hvam, L., Clarkson, J. & Maier, A. (2015). Formal computer-aided product family architecture design for mass customization. *Computers in Industry* 74, 58–70. doi:10.1016/j.compind.2015.07.006
- Browning, T. R. (2016). Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities. *IEEE Transactions on Engineering Management* 63 (1), 27–52. doi:10.1109/TEM.2015.2491283
- Brun, J., Le Masson, P. & Weil, B. (2018). Getting Inspiration or Creating Inspiration? The Role of Knowledge Structures in Idea Generation. In *15th International Design Conference DESIGN 2018* (S. 1793–1804). Dubrovnik, Kroatien.
- Bunce, D. M., Flens, E. A. & Neiles, K. Y. (2010). How Long Can Students Pay Attention in Class? A Study of Student Attention Decline Using Clickers. *Journal of Chemical Education* 87 (12), 1438–1443. doi:10.1021/ed100409p
- Bungartz, H.-J., Zimmer, S., Buchholz, M. & Pflüger, D. (2013). *Modellbildung und Simulation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Butenko, V., Gladysz, B., Maurath, M. & Albers, A. (2018). Model-based design guidelines for better knowledge transfer into industrial applications. In *NordDesign 2018* (S. 1–10). Linköping, Schweden.
- Cantamessa, M. (2003). An empirical perspective upon design research. *Journal of Engineering Design* 14 (1), 1–15. doi:10.1080/0954482031000078126
- Cao, D. X. & Fu, M. W. (2011). A Knowledge-Based Prototype System to Support Product Conceptual Design. *Computer-Aided Design and Applications* 8 (1), 129–147. doi:10.3722/cadaps.2011.129-147

- Cash, P., Stanković, T. & Štorga, M. (Hrsg.). (2016). *Experimental Design Research*. Cham: Springer International Publishing.
- Chakrabarti, A., Shea, K., Stone, R., Cagan, J., Campbell, M., Hernandez, N. V. & Wood, K. L. (2011). Computer-Based Design Synthesis Research: An Overview. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 11 (2), 21003. doi:10.1115/1.3593409
- Chiu, M.-H. & Lin, J.-W. (2019). Modeling competence in science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research* 1 (12), 1–11. doi:10.1186/s43031-019-0012-y
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.
- Danjou, S., Lupa, N. & Koehler, P. (2008). Approach for Automated Product Modeling Using Knowledge-Based Design Features. *Computer-Aided Design and Applications* 5 (5), 622–629. doi:10.3722/cadaps.2008.622-629
- Dantan, J. Y., Qureshi, A. J., Antoine, J. F., Eisenbart, B. & Blessing, L. (2013). Management of product characteristics uncertainty based on formal logic and characteristics properties model. *CIRP Annals* 62 (1), 147–150. doi:10.1016/j.cirp.2013.03.077
- Do, E. & Gross, M. D. (1996). Drawing as a means to design reasoning. In *Artificial Intelligence in Design. Workshop on Visual Representation, Reasoning and Interaction in Design* (S. 1–11). Palo Alto, CA.
- Dow, S., MacIntyre, B., Lee, J., Oezbek, C., Bolter, J. D. & Gandy, M. (2005). Wizard of Oz Support throughout an Iterative Design Process. *IEEE Pervasive Computing* 4 (4), 18–26. doi:10.1109/MPRV.2005.93
- Eckert, C., Albers, A., Bursac, N., Chen, H., Clarkson, P. J., Gericke, K., Gladysz, B., Maier, J. F., Rachenkova, G., Shapiro, D. & Wynn, D. (2015). Integrated Product and Process Models: Towards an Integrated Framework and Review. In *International Conference on Engineering Design ICED15* (S. 389–398). Mailand, Italien.
- Eckert, C., Alink, T., Ruckpaul, A. & Albers, A. (2011). Different notions of function: results from an experiment on the analysis of an existing product. *Journal of Engineering Design* 22 (11-12), 811–837. doi:10.1080/09544828.2011.603297
- Eckert, C., Clarkson, J. & Stacey, M. (2003). The spiral of applied research: A methodological view on integrated design research. In *International Conference on Engineering Design ICED03* (S. 245–246). Stockholm, Schweden.

- Eckert, C., Ruckpaul, A., Alink, T. & Albers, A. (2012). Variations in functional decomposition for an existing product: Experimental results. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 26 (2), 107–128. doi:10.1017/S0890060412000029
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Eifler, T. & Howard, T. J. (2018). The importance of robust design methodology: case study of the infamous GM ignition switch recall. *Research in Engineering Design* 29 (1), 39–53. doi:10.1007/s00163-017-0251-x
- Eisenbart, B., Gericke, K. & Blessing, L. T. M. (2017). Taking a look at the utilisation of function models in interdisciplinary design: insights from ten engineering companies. *Research in Engineering Design* 28 (3), 299–331. doi:10.1007/s00163-016-0242-3
- Eisenmann, M., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021a). Supporting early stages of design method validation - An approach to assess applicability. In *23th International Conference on Engineering Design ICED21* (S. 2821–2830). Gothenburg, Sweden.
- Eisenmann, M., Grauberger, P., Üreten, S., Krause, D. & Matthiesen, S. (2021b). Design method validation – an investigation of the current practice in design research. *Journal of Engineering Design* 32 (11), 621–645. doi:10.1080/09544828.2021.1950655
- Eppinger, S. D. & Browning, T. R. (2012). *Design structure matrix methods and applications*. Cambridge, Mass, USA: MIT Press.
- Erbe, T. (2018). CPM-Modeling in industry - a reflection. In *29. DFX-Symposium 2018* (S. 1–12). Tutzing.
- Erden, M. S., Komoto, H., van Beek, T. J., D'Amelio, V., Echavarria, E. & Tomiyama, T. (2008). A review of function modeling: Approaches and applications. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 22 (02), 147–169. doi:10.1017/S0890060408000103
- Fang, H. C., Ong, S. K. & Nee, A.Y.C. (2014). Product Remanufacturability Assessment based on Design Information. *Procedia CIRP* 15, 195–200. doi:10.1016/j.procir.2014.06.050
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.). (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8., vollst. überarb. Aufl. 2013). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

- Flechsigg, K.-H. (1996). *Kleines Handbuch didaktischer Modelle*. Eichenzell: Neu-land - Verl. für lebendiges Lernen.
- Freund, T., Klobardanz, H., Lotz, J. & Wuertenberger, J. (2015). An Approach to Analysing Interface Uncertainty using the Contact and Channel Model. In *International Conference on Engineering Design ICED'15* (S. 53–62). Mailand, Italien.
- Fuchs, D. K. (2005). *Konstruktionsprinzipien für die Problemanalyse in der Produktentwicklung*. Dissertationsschrift, Technische Universität München. München.
- Gadeyne, K., Pinte, G. & Berx, K. (2014). Describing the design space of mechanical computational design synthesis problems. *Advanced Engineering Informatics* 28 (3), 198–207. doi:10.1016/j.aei.2014.03.004
- Gao, F. J. L., Z. Q. Qian, X. J. Wang, Z. M. Bi & W. J. Zhang. (2015). A novel approach to embodiment design of a robotic system for maximum workspace. In *10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (S. 539–544). IEEE.
- Gawthrop, P. J. & Bevan, G. P. (2007). Bond-graph modeling. *IEEE Control Systems Magazine* 27 (2), 24–45. doi:10.1109/MCS.2007.338279
- Geis, C., Bierhals, R., Schuster, I., Badke-Schaub, P. & Birkhofer, H. (2008). Methods in practice—a study on requirements for development and transfer of design methods. In *10th International Design Conference DESIGN 2008* (S. 369–376). Dubrovnik, Kroatien.
- Gericke, K., Eckert, C. & Stacey, M. (2017). What do we need to say about a design method. In *21st international conference on engineering design, ICED17* (S. 101–110). Vancouver, Kanada.
- Gericke, K. & Eisenbart, B. (2017). The integrated function modeling framework and its relation to function structures. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 31 (04), 436–457. doi:10.1017/S089006041700049X
- Gladysz, B. & Albers, A. (2018a). C&C²-AFM - An embodiment design- and function-based approach for Analysis of Failure Mechanisms. *Procedia CIRP* 70, 53–58. doi:10.1016/j.procir.2018.03.244
- Gladysz, B. & Albers, A. (2018b). How do C&C²-Models Improve Efficiency, Comprehensibility and Scope in Failure Analysis - an Empirical Study based on two Live-Labs. In *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference* (S. 1127–1138). Dubrovnik, Kroatien.

- Gladysz, B., Spandl, L. & Albers, A. (2017). A function- and embodiment-based failure analysis method for an in-depth understanding of failure mechanisms. In *21st international conference on engineering design, ICED17* (S. 239–248). Vancouver, Kanada.
- Goel, A. K., Vattam, S., Wiltgen, B. & Helms, M. (2012). Cognitive, collaborative, conceptual and creative — Four characteristics of the next generation of knowledge-based CAD systems: A study in biologically inspired design. *Computer-Aided Design* 44 (10), 879–900. doi:10.1016/j.cad.2011.03.010
- Goetz, S., Schleich, B. & Wartzack, S. (2018). A new approach to first tolerance evaluations in the conceptual design stage based on tolerance graphs. *Procedia CIRP* 75, 167–172. doi:10.1016/j.procir.2018.04.030
- Grauberger, P., Bremer, F., Sturm, C., Hoelz, K., Wessels, H., Wagner, R., Lanza, G., Albers, A. & Matthiesen, S. (2020a). Qualitative Modelling in Embodiment Design – Investigating the Contact and Channel Approach through Analysis of Projects. In *16th International Design Conference DESIGN* (S. 897–906). Dubrovnik, Kroatien.
- Grauberger, P., Eisenmann, M., Stoitzner, J. & Matthiesen, S. (2021). Enhancing design method training with insights from educational research – optimization and evaluation of a training course for a qualitative modelling method approach. *Springer Nature Applied Sciences* 3 (827), 1–16. doi:10.1007/s42452-021-04817-9
- Grauberger, P., Eisenmann, M., Windisch, E. & Matthiesen, S. (2022). *Experimental method validation in embodiment design - investigating a method part of the C&C²-Approach*. Manuskript eingereicht: Preprint publiziert unter: (KIT Scientific Working Papers Nr. 181), Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.
- Grauberger, P., Goetz, S., Schleich, B., Gwosch, T., Matthiesen, S. & Wartzack, S. (2020b). A Conceptual Model Combination for the Unification of Design and Tolerancing in Robust Design. In *16th International Design Conference DESIGN* (S. 157–166). Dubrovnik, Kroatien.
- Grauberger, P., Heimicke, J., Nann, S., Albers, A. & Matthiesen, S. (2020c). A guideline for modelling relations of embodiment and function in agile development. *Springer Nature Applied Sciences* 2 (1475), 1–19. doi:10.1007/s42452-020-03271-3
- Grauberger, P., Voß, K. & Matthiesen, S. (2019). Testing Approaches in Embodiment Design - Investigating the Gain of Knowledge about Embodiment Function Relations in Testing Activities. In *22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)* (S. 1503–1512). Delft, Niederlande.

- Grauberger, P., Wessels, H., Gladysz, B., Bursac, N., Matthiesen, S. & Albers, A. (2020d). The contact and channel approach – 20 years of application experience in product engineering. *Journal of Engineering Design* 31 (5), 241–265. doi:10.1080/09544828.2019.1699035
- Greenhalgh, T. (1997). How to read a paper. Getting your bearings. Deciding what the paper is about. *BMJ (Clinical research ed.)* 315 (7102), 243–246. doi:10.1136/bmj.315.7102.243
- Greifeneder, R., Zelt, S., Seele, T., Bottenberg, K. & Alt, A. (2012). Towards a better understanding of the legibility bias in performance assessments. The case of gender-based inferences. *The British journal of educational psychology* 82 (Pt 3), 361–374. doi:10.1111/j.2044-8279.2011.02029.x
- Gu, C.-C., Hu, J., Peng, Y.-H. & Li, S. (2012). FCBS model for functional knowledge representation in conceptual design. *Journal of Engineering Design* 23 (8), 577–596. doi:10.1080/09544828.2011.629318
- Günther, M. & Velten, K. (2014). *Mathematische Modellbildung und Simulation : Eine Einführung Für Wissenschaftler, Ingenieure Und Ökonomen*. Berlin: John Wiley & Sons, Incorporated.
- Gürbüz, H., Ott, S. & Albers, A. (2019). Entwicklungsansätze für innovative Hochdrehzahlkupplung in E-Fahrzeugen. *Forschung im Ingenieurwesen* 83, 173–183. doi:10.1007/s10010-019-00306-z
- Haag, S. (2018). *Sequentieller Versuch zur HiL-unterstützten Validierung hybrider Antriebssysteme mit gekoppelten Antriebseinheiten* (Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Bd. 58). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Haas, A. (PTC university, Hrsg.). (2020). Spiralförmige Zug-KEs für Federn erzeugen. <https://learningconnector.ptc.com/content/tut-1080/spiralf%C3%B6rmige-zug-kes-f%C3%BCr-federn-erzeugen>. Zugriffen: 16. März 2020.
- Hattie, J. (2010). *Visible learning. A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement* (Reprinted.). London: Routledge.
- He, B., Cao, J. T., He, X. L., Jin, Z. X. & Fang, M. L. (2012). Lifting Platform in Jack-Up Offshore Platform Based on Virtual Prototyping. *Applied Mechanics and Materials* 198-199, 154–157. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.198-199.154
- He, B. & Huang, S. (2016). Functional synthesis of mechanisms under cost consideration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 230 (1), 91–99. doi:10.1177/0954405414542138

- He, B., Song, W. & Wang, Y. (2013). A feature-based approach towards an integrated product model in intelligent design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69 (1-4), 15–30. doi:10.1007/s00170-013-4991-0
- He, B., Song, W. & Wang, Y. (2015). Computational Conceptual Design Using Space Matrix. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 15 (1), 011004 (1-7). doi:10.1115/1.4029062
- Hill, R. C. & Levenhagen, M. (1995). Metaphors and Mental Models: Sensemaking and Sensegiving in Innovative and Entrepreneurial Activities. *Journal of Management* 21 (6), 1057–1074. doi:10.1177/014920639502100603
- Hilton, E., Li, W., Newton, S. H., Alemdar, M., Pucha, R. & Linsey, J. (2016). The Development and Effects of Teaching Perspective Free-Hand Sketching in Engineering Design. In *ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference: Volume 3: 18th International Conference on Advanced Vehicle Technologies ; 13th* (1–8). Charlotte, USA: American Society of Mechanical Engineers (ASME). doi:10.1115/DETC2016-60250.
- Hoelz, K., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2020). Methodical support for the investigation of system behaviour with analysis techniques - Overcoming the non-transparency in embodiment design. *Forschung im Ingenieurwesen* 84, 323–331. doi:10.1007/s10010-020-00417-y
- Hubka, V. (1973). *Theorie der Maschinensysteme. Grundlagen einer wissenschaftlichen konstruktionslehre*. Berlin: Springer.
- Hussy, W., Schreier, M. & Echterhoff, G. (2013). *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Jänsch, J. (2007). *Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz - Analyse und Empfehlungen aus kognitionswissenschaftlicher Sicht*. Dissertationsschrift, TU Darmstadt. Darmstadt.
- Kaufmann, D. & Eggensperger, P. (2017). *Gute Lehre in den Naturwissenschaften. Der Werkzeugkasten: Einfach, Schnell, Erfolgreich*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kleiner, S., Husung, S., Mandel, C., Albers, A. & Behrendt, M. (2017). (Model-Based) Systems Engineering für die Digitalisierung der Produktentwicklung. In *Tag des System Engineering 2017* (S. 135–146). Paderborn.

- Köhler, C. (2009). *Technische Produktänderungen – Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterung des CPM/PDD-Ansatzes*. Dissertation, Universität des Saarlandes. Saarbrücken.
- Künne, B. & Wiecek, D. (2010). Research to optimize the embodiment design of modules and components used in roller conveyors. In *IEEE International Conference on Automation and Logistics* (S. 495–500). Hong Kong, China.
- Langeveld, L. (2011). Product Design with Embodiment Design as a New Perspective. In D. Coelho (Hrsg.), *Industrial Design - New Frontiers*. London, United Kingdom: InTech.
- Lemburg, J. (2009). *Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese*. Dissertationsschrift, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Aachen.
- Leu, M. C., Wu, J. C. & Liu, X. F. (2009). Axiomatic functional and object-oriented product design framework. *CIRP Annals* 58 (1), 147–152.
doi:10.1016/j.cirp.2009.03.017
- Malmiry, R. B., Dantan, J.-Y., Pailhès, J. & Antoine, J.-F. (2016). A product functional modelling approach based on the energy flow by using characteristics-properties modelling. *Journal of Engineering Design* 27 (12), 817–843.
doi:10.1080/09544828.2016.1235261
- Marques, P. A., Alink, T., Saraiva, P. M., Albers, A., Rqueijo, J. G. & Guerreiro, F. F. (2009). Integration of the Contact and Channel Model with Axiomatic Design. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Axiomatic Design, ICAD* (S. 25–27). Caparica, Portugal.
- Marxen, L. (2014). *A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM*. Dissertationsschrift, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe.
- Matthiesen, S. (2002). *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Dissertationsschrift, Universität Karlsruhe. Karlsruhe.
- Matthiesen, S. (2017). Gut konstruieren kann nur, wer die Details versteht! Editorial. *Konstruktion* 69 (7-8), 3.
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung - Prozess und Methoden. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre* (9. Aufl.,). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH.

- Matthiesen, S., Grauberger, P., Bremer, F. & Nowoseltschenko, K. (2019a). Product Models in Embodiment Design - An Investigation of Challenges and Possibilities. *Springer Nature Applied Sciences 1* (1087), 1–11.
doi:10.1007/s42452-019-1115-y
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Hölz, K., Nelius, T., Bremer, F., Wettstein, A., Gesinger, A., Pflieger, B., Nowoseltschenko, K. & Voß, K. (2018a). *Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse und Synthese* (KIT Scientific Working Papers Nr. 58), Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Nelius, T. & Hölz, K. (2017a). *Methodische Unterstützung des Erkenntnisgewinns in der Produktentwicklung durch Konstruktionshypothesen* (KIT Scientific Working Papers Nr. 61), Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.
- Matthiesen, S., Grauberger, P. & Schrempp, L. (2019b). Extended Sequence Modelling in Design Engineering – Gaining and Documenting Knowledge about Embodiment Function Relations with the C&C²-Approach. In *22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)* (S. 1483–1492). Delft, Niederlande.
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Sturm, C. & Steck, M. (2018b). From Reality to Simulation – Using the C&C²-Approach to Support the Modelling of a Dynamic System. In *Procedia CIRP* (Bd. 70, S. 475–480). Elsevier B.V.
- Matthiesen, S., Grauberger, P. & Windisch, E. (2020). Erkenntnisgewinn in der Gestaltung mit Rapid Prototyping Ersatzsystemen durch Modellbildung und Parametertransformation. In *Konstruktion für die Additive Fertigung* (S. 145–164). Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Matthiesen, S., Gwosch, T., Mangold, S., Grauberger, P., Steck, M. & Cersowsky, S. (2017b). Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017* (S. 167–176). Stuttgart.
- Matthiesen, S. & Ruckpaul, A. (2012). New Insights on the Contact&Channel-Approach - Modelling of Systems with Several Logical States. In *International Design Conference. DESIGN 2012* (S. 1019–1028). Dubrovnik, Kroatien.
- Matthiesen, S., Wettstein, A. & Grauberger, P. (2018c). Analysis of dynamic system behaviour using sequence modelling with the C&C²-Approach – a case study on a power tool hammer mechanism. In *NordDesign 2018* (Bd. 101, S. 1–10). Linköping, Schweden.

- Matthiesen, S., Wilhelm, M., Grauberger, P., Naue, I. & Werner, T. (2019c). Erkenntnisgewinn durch Systemanalyse und Testing – Ein Ansatz zur Unterstützung der Entwicklung von Systemen mit neuartigen Wirkprinzipien. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2019* (S. 153–166). Stuttgart.
- Meboldt, M., Matthiesen, S. & Lohmeyer, Q. (2012). The Dilemma of Managing Iterations in Time-to-market Development Processes. In *2nd International Workshop on Modelling and Management of Engineering Processes* (S. 127–139). Cambridge, UK.
- Meißner, M., Gericke, K., Gries, B. & Blessing, L. (2005). Eine adaptive Produktentwicklungsmethodik als Beitrag zur Prozessgestaltung in der Produktentwicklung. In H. Meerkamm (Hrsg.), *16. Symposium "Design for X"* (S. 67–76). Neukirchen.
- Mills, E. J., Chan, A.-W., Wu, P., Vail, A., Guyatt, G. H. & Altman, D. G. (2009). Design, analysis, and presentation of crossover trials. *Trials* 10 (1), 27. doi:10.1186/1745-6215-10-27
- Moeser, G., Albers, A. & Kumpel, S. (2015). Usage of free sketches in MBSE raising the applicability of Model-Based Systems Engineering for mechanical engineers. In *Systems Engineering ISSE 2015* (S. 50–55). Rom, Italien.
- Mokhtarian, H., Coatanéa, E. & Paris, H. (2017). Function modeling combined with physics-based reasoning for assessing design options and supporting innovative ideation. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 31 (04), 476–500. doi:10.1017/S0890060417000403
- Muenzer, C. & Shea, K. (2017). Simulation-Based Computational Design Synthesis Using Automated Generation of Simulation Models From Concept Model Graphs. *Journal of Mechanical Design* 139 (7), 71101. doi:10.1115/1.4036567
- Nagel, R. L., Stone, R. B., Hutcheson, R. S., McAdams, D. A. & Donndelinger, J. A. (2009). Function Design Framework (FDF): Integrated Process and Function Modeling for Complex Systems. In *20th International Conference on Design Theory and Methodology, 2nd International Conference on Micro- and Nanosystems* (S. 273–286). New York, NY: ASME.
- Nelius, T., Eisenmann, M., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021a). Tatort Technik (Teil 1) – Herausforderungen bei der Problemanalyse in der Konstruktion. *Konstruktion* 73 (03), 70–74. doi:10.37544/0720-5953-2021-03-70
- Nelius, T., Eisenmann, M., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021b). Tatort Technik (Teil 2) – Unterstützung bei der Problemanalyse in der Konstruktion mit der

- Design-ACH-Methode. *Konstruktion* 73 (04), 70–74. doi:10.37544/0720-5953-2021-04-70
- Nelius, T. & Matthiesen, S. (2019). Experimental Evaluation of a Debiasing Method for Analysis in Engineering Design. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1* (1), 489–498. doi:10.1017/dsi.2019.53
- Ohmer, M. (2008). *Ein Beitrag zur Synthese technischer Systeme auf Basis des Contact & Channel Model C&CM*. Dissertationsschrift, Universität Karlsruhe. Karlsruhe.
- Okoli, C. & Pawlowski, S. D. (2004). The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. *Information & Management* 42 (1), 15–29. <https://spectrum.library.concordia.ca/976864/>.
- Pahl, G., Beitz, W., Blessing, L., Feldhusen, J., Grote, K.-H. & Wallace, K. (2007). *Engineering Design. A Systematic Approach* (Third Edition). London: Springer-Verlag London Limited.
- Pedersen, K., Emblemsvag, J., Bailey, R., Allen, J. K. & Mistree, F. (2000). The "Validation Square" - Validating Design Methods. *Proceedings of DETC '00, 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences, Baltimore, Maryland, USA*, 1–13.
- Posner, B., Binz, H. & Roth, D. (2014). Supporting lightweight design potential assessment in the conceptual phase. In *International Design Conference DESIGN 2014* (S. 353–362). Dubrovnik, Kroatien.
- Posner, B., Binz, H. & Roth, D. (2015). Extension of the Lightweight Design Thinking Tools for the Application on More Complex Problems. In *International Conference on Engineering Design ICED15* (S. 319–328). Mailand, Italien.
- Posner, B., Binz, H., Roth, D., Vila, N. G. & Burkhardt, J. (2016). Systematische Entwicklung von Leichtbau-Lösungen im Maschinenschutz. In *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* (Bd. 06, S. 90–93). Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG.
- Rajaguru, P., Stoyanov, S., Tang, Y. K., Bailey, C., Claverley, J., Leach, R. & Topham, D. (2010). Numerical modelling methodology for design of miniaturised integrated products - an application to 3D CMM micro-probe development. In *11th International Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)* (S. 1–8). Bordeaux, Frankreich: IEEE.

- Rasoulifar, G., Prudhomme, G. & Brissaud, D. (2012). Coupling Engineering Knowledge With Product Design Knowledge by the Means of Multiple View Product Model. In *Volume 3: Advanced Composite Materials and Processing; Robotics; Information Management and PLM; Design Engineering* (S. 777–783). Nantes, Frankreich: ASME.
- Reich, Y. (1994). Layered models of research methodologies. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 8 (4), 263–274.
doi:10.1017/S0890060400000949
- Reiß, N., Albers, A. & Bursac, N. (2017). Approaches to increasing method acceptance in agile product development processes. In *DS 87-4 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 4: Design Methods and Tools, Vancouver, Canada, 21-25.08. 2017* (S. 435–444).
- Renger, M., Kolfschoten, G. L. & Vreede, G. J. de. (2008). Challenges in collaborative modelling: a literature review and research agenda. *International Journal of Simulation and Process Modelling* 4 (3/4), 248.
doi:10.1504/IJSPM.2008.023686
- Riascos, R., Levy, L., Stjepandić, J. & Fröhlich, A. (2015). Digital Mock-up. In J. Stjepandić, N. Wognum & W. J.C. Verhagen (Hrsg.), *Concurrent Engineering in the 21st Century* (S. 355–388). Cham: Springer International Publishing.
- Rihtaršič, J., Žavbi, R. & Duhovnik, J. (2012). Application of wirk elements for the synthesis of alternative conceptual solutions. *Research in Engineering Design* 23 (3), 219–234. doi:10.1007/s00163-012-0127-z
- Risko, E. F., Anderson, N., Sarwal, A., Engelhardt, M. & Kingstone, A. (2012). Everyday Attention. Variation in Mind Wandering and Memory in a Lecture. *Applied Cognitive Psychology* 26 (2), 234–242. doi:10.1002/acp.1814
- Robbins, N. & Heiberger, R. (2011). Plotting Likert and other rating scales. In *Proceedings of the 2011 Joint Statistical* (S. 1058–1066). Miami, USA.
- Roth, K. (2000). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*. Berlin: Springer.
- Sarkar, B., Chakrabarti, A. & Ananthasuresh, G. K. (2017). Synthesis of feedback-based design concepts for sensors. *Research in Engineering Design* 28 (1), 131–151. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00163-016-0231-6.pdf>.
- Schaefer, T. (2018). *Ein gesamtsystemischer Ansatz zur simulationsgestützten Analyse und Optimierung eines Bohrhammerschlagwerkes*. Dissertationsschrift, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe.

- Schaper, N., Reis, O., Wildt, J., Horvath, E. & Bender, E. (2012). Fachgutachten zur Kompetenzorientierung in Studium und Lehre. *HRK projekt nexus*, 1–148.
- Scherer, H. (2016). *Modellbasierte Methoden zur Modellierung des Zielsystems und des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs zur Unterstützung der Serienentwicklung von Baukästen am Beispiel von Hybrid-Triebstrangsystemen*. Dissertationsschrift, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe.
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L. & Wartzack, S. (2014). Skin Model Shapes: A new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering. *Computer-Aided Design* 50, 1–15. doi:10.1016/j.cad.2014.01.001
- Schleich, B., Wärmefjord, K., Söderberg, R. & Wartzack, S. (2018). Geometrical Variations Management 4.0: towards next Generation Geometry Assurance. *Procedia CIRP* 75, 3–10. doi:10.1016/j.procir.2018.04.078
- Schleinkofer, U., Laufer, F., Zimmermann, M., Roth, D. & Bauernhansl, T. (2018). Resource-efficient manufacturing systems through lightweight construction by using a combined development approach. *Procedia CIRP* 72, 856–861. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118302804>.
- Schroeder, R. G., Linderman, K., Liedtke, C. & Choo, A. S. (2008). Six Sigma: Definition and underlying theory*. *Journal of Operations Management* 26 (4), 536–554. doi:10.1016/j.jom.2007.06.007
- Siebertz, K., van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017). *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Simpson, T. W., Poplinski, J. D., Koch, P. N. & Allen, J. K. (2001). Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations. *Engineering with Computers* 17 (2), 129–150. doi:10.1007/PL00007198
- Skowaisa, T. (2020). *Entwicklung einer Schnittstelle zwischen qualitativer und quantitativer Modellierung in der Gestaltung*. Unveröffentlichte Bachelor-/Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe.
- Smallwood, J. & Schooler, J. W. (2006). The restless mind. *Psychological Bulletin* 132 (6), 946–958. doi:10.1037/0033-2909.132.6.946
- Sokolowski, J. A. & Banks, C. M. (2010). *Modeling and Simulation Fundamentals*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Srinivasan, R. S., Wood, K. L. & McAdams, D. A. (1996). Functional tolerancing: A design for manufacturing methodology. *Research in Engineering Design* 8 (2), 99–115.

- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer-Verlag.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis. FMEA from theory to execution* (2nd ed., rev. and expanded.). Milwaukee, WI: ASQ Quality Press.
- Subrahmanian, E., Konda, S. L., Levy, S. N., Reich, Y., Westerberg, A. W. & Monarch, I. (1993). Equations aren't enough: informal modeling in design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 7 (4), 257–274. doi:10.1017/S0890060400000354
- Suh, N. P. (1998). Axiomatic Design Theory for Systems. *Research in Engineering Design* 10 (4), 189–209. doi:10.1007/s001639870001
- Thau, S. (2013). *Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C2-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld*. Dissertationsschrift, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe.
- Thomke, S. (2001). Enlightened experimentation. The new imperative for innovation. *Harvard business review* 79 (2), 66–75.
- Umeda, Y. & Tomiyama, T. (1997). Functional reasoning in design. *IEEE Expert* 12 (2), 42–48. doi:10.1109/64.585103
- Üreten, S., Eisenmann, M., Nelius, T., Cao, S., Matthiesen, S. & Krause, D. (2019). A Concept Map for Design Method Experiments in Product Development – A Guideline for Method Developers. In *DFX 2019: Proceedings of the 30th Symposium Design for X, 18-19 September 2019, Jesteburg, Germany* (S. 147–158).
- Vajna, S., Weber, C., Zeman, K., Hehenberger, P., Gerhard, D. & Wartzack, S. (2018). *CAX für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung* (SpringerLink Bücher, 3., vollständig neu bearbeitete Auflage). Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg.
- VDI, 2211:2003-03 Blatt 2 (2003). *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI, 2221:2018-03 Blatt 1 (2018). *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth Verlag.
- Vermaas, P. (2016). A logical critique of the expert position in design research: beyond expert justification of design methods and towards empirical validation. *Design Science* 2, 26. doi:10.1017/dsj.2016.6

- Vester, F. (2002). *Neuland des Denkens. Vom technokratischen zum kybernetischen Zeitalter* (dtv dtv-Sachbuch, Bd. 33001, 12. Aufl.). München: Dt. Taschenbuch-Verl.
- Vogel, S. (2021). *Das Lastpfad und Knotenmodell - Eine Erweiterung des C&C²-Ansatzes zur Bewertung von Ersatzgrößen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme*. Dissertation, TU Darmstadt. Darmstadt.
- Vogel, S., Vorwerk-Handing, G. & Kirchner, E. (2019). Analysemodell für die Priorisierung von Weiterentwicklungsoptionen zur Sensorintegration. In *DFX 2019: Proceedings of the 30th Symposium Design for X, 18-19 September 2019, Jesteburg, Germany* (S. 303–314).
- Wallace, K. (2011). Transferring Design Methods into Practice. In H. Birkhofer (Hrsg.), *The future of design methodology* (S. 239–248). London: Springer.
- Walter, B., Albers, A., Haupt, F. & Bursac, N. (2016). Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor – Konzipierung und Implementierung eines Live- Lab. In *27. DFX-Symposium 2016* (S. 283–295). Hamburg, Germany: Tutech Verlag Tu-Tech Innovation GmbH.
- Weber, C. (2005). CPM/PDD - An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes. In *Proceedings of the 2nd German - Israeli Symposium* (S. 159–179). Stuttgart, Germany: Fraunhofer-IRB-Verlag.
- Weber, C. (2014). Modelling Products and Product Development Based on Characteristics and Properties. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design. Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* (S. 327–352). London: Springer London.
- Weidmann, D., Isemann, M., Kandlbinder, P., Hollauer, C., Kattner, N., Becerril, L. & Lindemann, U. (2017). Product Models in Mechatronic Design: Literature Analysis on the Interdisciplinary Character of Product Models. In *2017 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)* (S. 1–7). IEEE.
- Westmoreland, S., Ruocco, A. & Schmidt, L. (2011). Analysis of Capstone Design Reports: Visual Representations. *Journal of Mechanical Design* 133 (5), 476. doi:10.1115/1.4004015
- Wettstein, A., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021). Modelling and Parameter Identification of a Dynamic Mechanical System Using Sequence Modelling of Embodiment Function Relations with the C&C²-Approach – a Case Study on a

- Hammer Mechanism of an Impact Wrench. *Springer Nature Applied Sciences* 3 (128), 1–17. doi:10.1007/s42452-021-04149-8
- Wilson, K. & Korn, J. H. (2007). Attention During Lectures. Beyond Ten Minutes. *Teaching of Psychology* 34 (2), 85–89. doi:10.1080/00986280701291291
- Wölkl, S. & Shea, K. (2009). A Computational Product Model for Conceptual Design Using SysML. In *Volume 2: 29th Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B* (S. 635–645). San Diego, USA: ASME.
- Yang, M. C. (2009). Observations on concept generation and sketching in engineering design. *Research in Engineering Design* 20 (1), 1–11. doi:10.1007/s00163-008-0055-0
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications. Design and methods* (Sixth edition). Los Angeles: Sage.
- Zhan, W. & Huang, P. (2018). Physics-Based Modeling for Lap-Type Joints Based on the Iwan Model. *Journal of Tribology* 140 (5), 51401. doi:10.1115/1.4039530
- Zheng, C., Hehenberger, P., Le Duigou, J., Bricogne, M. & Eynard, B. (2017). Multidisciplinary design methodology for mechatronic systems based on interface model. *Research in Engineering Design* 28 (3), 333–356. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00163-016-0243-2.pdf>.
- Zingel, C., Albers, A., Matthiesen, S. & Maletz, M. (2012). Experiences and advancements from one year of explorative application of an integrated model-based development technique using C&C 2-A in SysML. In *IAENG International Journal of Computer Science* (Bd. 39, Vol 39 Issue 2, S. 165–181). Hong Kong: International Association of Engineers.

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co-betreut wurden:

- Konrad, V. (2018). *Systemverständnis durch systematisches Testing*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe.
- Rammert, T. (2020). *Experimentelle Untersuchung von Teilaspekten des C&C²-Ansatzes*. Unveröffentlichte Masterarbeit, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe.

- Schrempp, L. (2018). *Modellbildung und Testing am Beispiel Klemmrollenfreilauf*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe.
- Skowaisa, T. (2020). *Entwicklung einer Schnittstelle zwischen qualitativer und quantitativer Modellierung in der Gestaltung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe.
- Stoitzner, J. (2020). *Optimierung einer Vermittlung des C&C²- Ansatzes*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe.
- Voß, K. (2019). *Analyse des Einflusses von erkannten Gestalt- Funktion-Zusammenhängen auf ein Erfolgskriterium in der Gestaltung - Feldstudie in einem studentischen Entwicklungsprojekt*. Unveröffentlichte Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe.
- Werner, T. (2018). *Erkenntnisgewinn durch Systemanalyse und Testing – Aufbau einer Entwicklungsumgebung für eine Wärmekraftmaschine mit Formgedächtnisaktoren*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe.
- Windisch, E. (2018). *Methodische Analyse der Zusammenhänge von Gestalt und Funktion in Konstruktionen mit Hilfe von Rapid Prototyping*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe.

Glossar

Begriff	Definition
Modell	Nach Stachowiak (1973) ist ein Modell ein pragmatisch verkürztes Abbild eines Originals. In dieser Forschungsarbeit wird unter Modell immer ein Modell des Produkts verstanden. Abweichende Modellverständnisse sind im Text spezifiziert.
Qualitatives Modell	Qualitative Einflussgrößen in einem Modell beschreiben, ob ein Parameter prinzipiell als relevant für die Fragestellung des Modells betrachtet werden kann (Bungartz et al. 2013). Ein qualitatives Modell ermöglicht damit die Abbildung von Elementen, ohne ihnen Werte zuweisen zu müssen.
Quantitatives Modell	Quantitative Werte beschreiben, wie groß Ausprägung und Einfluss eines Parameters in einem Modell sind (Bungartz et al. 2013). Ein quantitatives Modell ermöglicht damit quantitative Aussagen auf Basis der in ihm abbildbaren Elementen. Seinen Elementen müssen jedoch Werte zugewiesen werden, um es nutzen zu können.
Implizites/mentales Modell	Implizite Modelle beinhalten individuelles Wissen und Fähigkeiten (Alavi und Leidner 2001). Als implizites oder mentales Modell wird hier die Modellvorstellung im Kopf von Konstrukteur(innen) verstanden. Dieses Modell liegt zumindest teilweise unbewusst vor und kann sowohl qualitatives als auch quantitatives Wissen beinhalten (Meboldt et al. 2012).
Explizites Modell	Ein explizites Modell liegt in einer von seinem Ersteller unabhängigen Form in symbolischer oder natürlicher Sprache vor (Alavi und Leidner 2001). Es kann auf verschiedene Weisen dokumentiert sein und unterschiedliche Umfänge besitzen, beispielsweise als einfache Skizze (qualitativ) oder Mehrkörpersimulationsmodell (quantitativ/rechnerunterstützt).
Gestalt-Funktion-Zusammenhang	Der GFZ beschreibt einen Zusammenhang einer Gestalt mit einer Funktion oder einem Systemverhalten. Er kann

in verschiedenen Formen beschrieben werden, beispielsweise grafisch, in einer Matrix oder als mathematische Gleichung (Matthiesen 2021).

Anhang A

Forschungsdaten zur Literaturstudie zu Produktmodellen

Tabelle A-1: Einordnung von Produktmodellen der Literaturstudie nach Matthiesen et al. (2019a)

#	Produktmodell (Abkürzung im Framework) (Quellen) Englische Originalnamen sind nicht übersetzt	Art der Darstellung					Art der Information				
		Analytisch	Grafisch	Tabellen/Matrix	Textuell	Physisch	Funktion	Verhalten	Gestalt qualitativ	Gestalt quantitativ	Framework Cluster
1	2D / 3D CAD¹ Modelle (Atherton et al. 2018; Dantan et al. 2013; Eifler und Howard 2018)		x							x	II
2	Axiomatic Design Model (Leu et al. 2009)	x		x			x			x	II
3	Behavioral Matrix (Cao und Fu 2011)	x		x				x		x	VI
4	Bond Graph Model (Muenzer und Shea 2017)		x	x				x	x		II
5	Contact and Channel Modell (C&C²-M) (Albers et al. 2009; Boersting et al. 2008; Freund et al. 2015)		x				x	x	x		III
6	Connectivity Graph (Ameri et al. 2008)		x	x					x		II
7	CPM² (Köhler 2009; Weber 2005, 2014; Zhan und Huang 2018)		x	x				x	x		II
8	Design Structure Matrix (DSM)			x			x	x	x		VI

¹ Computer-aided design

² Characteristics Properties Modeling

#	Produktmodell (Abkürzung im Framework) (Quellen) Englische Originalnamen sind nicht übersetzt	Art der Darstellung					Art der Information			Framework Cluster
		Analytisch	Grafisch	Tabelle/Matrix	Textuell	Physisch	Funktion	Verhalten	Gestalt qualitativ	
	(Bonev et al. 2015; Browning 2016; Eppinger und Browning 2012)									
9	Digital Mock-Up (Danjou et al. 2008; Riascos et al. 2015)	x	x				x		x	III
10	FEM³ Simulationsmodell (FEM) (Danjou et al. 2008; Eifler und Howard 2018; Rajaguru et al. 2010)	x	x				x		x	VII
11	Funktionsstruktur (Ameri et al. 2008; Chakrabarti et al. 2011)		x				x			VI
12	Funktionsbaum (Nagel et al. 2009)		x				x			VI
13	Integrated Function Model (IF Model) (Gericke und Eisenbart 2017)		x	x			x	x	x	VIII
14	Kinematic Model (Gao et al. 2015)	x	x					x	x	I
15	Model of Langeveld (Langeveld) (Langeveld 2011)		x				x		x	IV
16	Models according to He (He) (He et al. 2013, 2015; He und Huang 2016)		x				x		x	II
17	Models based on Gero (Gero) (Goel et al. 2012; Gu et al. 2012; Mokhtarian et al. 2017)		x	x	x		x	x	x	II
18	Mehrkörpersimulation (MBS) (Danjou et al. 2008)	x	x					x		VII
19	Node Link Diagram (NLD) (Bonev et al. 2015)		x					x		VI

³ Finite element method

#	Produktmodell (Abkürzung im Framework) (Quellen) Englische Originalnamen sind nicht übersetzt	Art der Darstellung				Art der Information				Framework Cluster	
		Analytisch	Grafisch	Tabelle/Matrix	Textuell	Physisch	Funktion	Verhalten	Gestalt qualitativ		Gestalt quantitativ
20	NVH⁴ Modell (Danjou et al. 2008)	x	x					x		x	VII
21	Parametric Associativity Graph (PAG) (Ameri et al. 2008)		x						x	x	IV
22	Produktarchitektur (Feldhusen und Grote 2013)			x			x		x		VIII
23	Multi-view Product Model (MVP Model) (Rasoulifar et al. 2012)		x						x		VIII
24	Product Structure Model (Baxter et al. 2008)		x	x			x			x	IV
25	Prototyp (Andreasen et al. 2015)					x		x	x	x	III
26	Pseudo Rigid Body Model (PRBM) (Berselli et al. 2016; Bilancia et al. 2017; He et al. 2012)	x	x						x		VII
27	Remanufacturability Model (RM) (Fang et al. 2014)	x	x							x	VII
28	Model of Rihtaršič (Rihtaršič) (Rihtaršič et al. 2012)		x					x	x		I
29	SAPPHIRE⁵ (Sarkar et al. 2017)			x			x	x	x		VI
30	Skizzen (Andreasen et al. 2015)		x				x	x	x		I
31	Statistische Modelle (Künne und Wieczorek 2010)	x	x					x		x	VII
32	Symbolische Abbildungen (Andreasen et al. 2015)		x				x	x	x		I

⁴ Noise Vibration Harshness

⁵ "State Action Parts Phenomenon Input ORgan Effect"

		Art der Darstellung					Art der Information			Framework Cluster
		Analytisch	Grafisch	Tabelle/Matrix	Textuell	Physisch	Funktion	Verhalten	Gestalt qualitativ	
#	Produktmodell (Abkürzung im Framework) (Quellen) Englische Originalnamen sind nicht übersetzt									
33	SysML⁶ Modelle (Chakrabarti et al. 2011; Eisenbart et al. 2017; Gadeyne et al. 2014; Rasoulifar et al. 2012; Wökl und Shea 2009; Zheng et al. 2017; Zingel et al. 2012)		x	x			x	x	x	II
34	Wirkraummodell (Beetz et al. 2018)		x				x	x	x	III

⁶ Systems Modeling Language

Anhang B

Forschungsdaten zur Projektanalyse zum C&C²-Ansatz

Tabelle B-1: Identifizierte Anwendungsfälle des C&C²-Ansatzes nach Grauberger et al. (2020d)

#	Technisches System	Publikation	Modellzweck	Beteiligte Forschungsinstitute	Nutzungsform
1	Humanoider Roboter	(Albers et al. 2010)	DD	D	O
2	Werkzeugmaschine	(Ohmer 2008)	CU	D	MP
3	Humanoider Roboter	(Albers et al. 2011b)	MG	D	O
4	Elektrischer Verbinder	(Albers et al. 2011c)	OI	D	O
5	Pulvergetriebenes Power-Tool	(Matthiesen und Ruckpaul 2012)	OI	D	A
6	Humanoider Roboter	(Boersting et al. 2008)	DD	D	MP
7	Hybrid Antriebsstrang	(Albers und Wintergerst 2014)	OI	D	O
8	Einscheibenkupplung	(Albers et al. 2016b)	OI	D	O
9	Antriebswelle	(Albers et al. 2005)	COM	D	MP
10	Schraubverbindung	(Albers et al. 2008c)	OI	D	MP
11	Container Kran	(Albers et al. 2004a)	COM	D	MP
12	Mehrscheibenkupplung	(Albers et al. 2014)	OI	D	O
13	Humanoider Roboter	(Albers et al. 2009)	DD	D	MP
14	CVT Getriebe	(Albers et al. 2004c)	CU	D	MP
15	Hybrid Antriebsstrang	(Albers und Alink 2007)	OI	D	MP
16	Nockenwelle	(Albers et al. 2016d)	MG	D	O
17	Biegebalken	(Posner et al. 2014)	CU	I	A
18	Tripod Ständer	(Freund et al. 2015)	OI	I	A
19	Biegebalken	(Posner et al. 2015)	CU	I	A

Anhang B

20	Bearbeitungs- zentrum	(Posner et al. 2016)	CU	I	A
21	Rennwagen- Aktuator	(Gladysz et al. 2017)	OI	D	O
22	Laser-Einstel- lungsführung	(Marques et al. 2009)	OI	D,I	MP
23	Hybrid An- triebsstrang	(Zingel et al. 2012)	DD	D	O
24	E-hybrid Modul	(Scherer 2016)	COM	D	O
25	Rennwagen- Aktuator	(Gladysz und Albers 2018b)	OI	D	O
26	Akkuschrauber	(Matthiesen et al. 2018b)	OI	D	O
27	Hochgeschwin- digkeitskupp- lung	(Gürbüz et al. 2019)	OI	D	O
28	Formgedächtnis- Motor	(Matthiesen et al. 2019c)	OI	D,I	O
29	Hybrides Schienenfahr- zeug	(Haag 2018)	OI	I	O
30	Rennwagen- Aktuator	(Gladysz und Albers 2018a)	OI	D	O
31	Schlag- schrauber	(Matthiesen et al. 2018c)	OI	D	O
32	Schiebedach- system	(Matthiesen et al. 2019b)	OI	D	A
33	Druckaus- gleichsystem	(Butenko et al. 2018)	COM	D	O
34	E-Board	(Gladysz und Albers 2018b)	OI	D	O
35	Vakuumpumpe	(Albers et al. 2019b)	DD	D	O
36	Hygienic De- sign	(Beetz et al. 2017)	DD	I	A
37	Verpackungs- maschine	(Schleinkofer et al. 2018)	DD	I	A
38	Bohrhammer	(Schaefer 2018)	OI	D	O
<p>Legende: Modellzweck nach Andreasen et al. (2015): CU = Konzeptionierung; OI = Erkenntnisgewinn; DD = Produktdefinition; MG = Wissensverwaltung; COM = Kommunikation Forscher im Projekt: D = Entwickler; I = Unabhängige Forscher Anwendung des C&C²-Ansatzes: MP = Entwicklungsphase; O = Unveränderter Ansatz; A = Adaption des Ansatzes</p>					

Anhang C

Der zweiseitige englische Fragebogen zur Projektanalyse in Kapitel 4.3.

Situation analysis

Project duration [months]
 Team member count

Example: Bilateral industrial project with the development department of

Type of project, specialties:

Please fill in (checkbox - text field)
 Dropdown for selection

Help and examples are provided for some cells, just click on them.

Problem containment

How was it done? Example: 2 day expert workshop to define the project aim

Initial model purpose

	Purposes acc. to Andreassen	Examples:
<input type="checkbox"/>	Capture the unknown	Synthesize a concept / draw an idea
<input type="checkbox"/>	Define the design	build up a CAD model
<input type="checkbox"/>	Obtain insight	analyse dynamic system behaviour
<input type="checkbox"/>	Manage	structure information
<input type="checkbox"/>	Communicate	explain something to the team

Comments:

Analysis

Techniques

Used?	Technique	Helpful	Easy to use	Why was it helpful/easy or not?
<input type="checkbox"/>	Zoom			
<input type="checkbox"/>	Shift			
<input type="checkbox"/>	Change perspective			
	(other - please specify)			
	(other - please specify)			
	(other - please specify)			
	(other - please specify)			

Visualisation

(Virtual) model	Helpful	Easy to use	Why was it helpful/easy or not?

real system	Helpful	Easy to use	Why was it helpful/easy or not?

Comments:

Anhang C

Model building

Elements of the C&C²-Approach

Used?	Element	Helpful	Easy to use	Why was it helpful/easy or not?
<input type="checkbox"/>	States			
<input type="checkbox"/>	WSP			
<input type="checkbox"/>	CSS			
<input type="checkbox"/>	C			
<input type="checkbox"/>	Parameters			
	(others - please specify)			

Additional models

Non-executable models (e.g. graphs, function trees, sketches, SysML)

model	Helpful	Easy to use	Why was it helpful/easy or not?

Executable models (e.g. CAD, kinematic animation, FEM, MBS, Regression models)

model	Helpful	Easy to use	Why was it helpful/easy or not?

Comments: for gain of insight, different technologies could be compared based on the analysis

Verification / validation

- Hypotheses formulated
- Hypotheses evaluated - virtual tests
- Hypotheses evaluated - physical tests

Model usage

Main purpose of the model(s)

Purposes acc. to Andreassen

If changed / limited compared to problem containment, why?

<input type="checkbox"/>	Capture the unknown	
<input type="checkbox"/>	Define the design	
<input type="checkbox"/>	Obtain insight	
<input type="checkbox"/>	Manage	
<input type="checkbox"/>	Communicate	

Concept development / Synthesis

- Product concept developed
- Physical prototype built up
- Virtual prototype developed / implemented

Comments:

Vollständige Liste der eigenen (wissenschaftlichen) Publikationen

- Albers, A., Matthiesen, S., Revfi, S., Schönhoff, C., Grauberger, P. & Heimicke, J. (2019). Agile Lightweight Design - The Extended Target Weighing Approach in ASD - Agile Systems Design Using Functional Modelling with the C&C 2 -Approach. In *22nd International Conference on Engineering Design ICED19*. Delft, Niederlande.
- Eisenmann, M., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021). Supporting early stages of design method validation - An approach to assess applicability. In *23th International Conference on Engineering Design ICED21*. Gothenburg, Sweden.
- Eisenmann, M., Grauberger, P., Üreten, S., Krause, D. & Matthiesen, S. (2021). Design method validation – an investigation of the current practice in design research. *Journal of Engineering Design* 32 (11), 621–645.
doi:10.1080/09544828.2021.1950655
- Grauberger, P., Bremer, F., Matthiesen, S., Goetz, S., Schleich, B. & Wartzack, S. (2020). Herausforderungen der Verknüpfung von Gestaltungs- und Toleranzdomäne zur Robustheitsbewertung von Produktkonzepten. In *4. Summer-school Toleranzmanagement*. Erlangen.
- Grauberger, P., Bremer, F., Sturm, C., Hoelz, K., Wessels, H., Wagner, R., Lanza, G., Albers, A. & Matthiesen, S. (2020). Qualitative Modelling in Embodiment Design – Investigating the Contact and Channel Approach through Analysis of Projects. In *16th International Design Conference DESIGN*. Dubrovnik, Kroatien.
- Grauberger, P., Eisenmann, M., Stoitzner, J. & Matthiesen, S. (2021). Enhancing design method training with insights from educational research – optimization and evaluation of a training course for a qualitative modelling method approach. *Springer Nature Applied Sciences* 3 (827), 1–16. doi:10.1007/s42452-021-04817-9
- Grauberger, P., Eisenmann, M., Windisch, E. & Matthiesen, S. (2022). *Experimental method validation in embodiment design - investigating a method part of the C&C²-Approach*. Manuskript eingereicht: Preprint publiziert unter: (KIT Scientific Working Papers Nr. 181), Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.

- Grauberger, P., Goetz, S., Schleich, B., Gwosch, T., Matthiesen, S. & Wartzack, S. (2020). A Conceptual Model Combination for the Unification of Design and Tolerancing in Robust Design. In *16th International Design Conference DESIGN*. Dubrovnik, Kroatien.
- Grauberger, P., Heimicke, J., Nann, S., Albers, A. & Matthiesen, S. (2020). A guideline for modelling relations of embodiment and function in agile development. *Springer Nature Applied Sciences* 2 (1475), 1–19. doi:10.1007/s42452-020-03271-3
- Grauberger, P., Voß, K. & Matthiesen, S. (2019). Functional Analysis in Embodiment Design - An Investigation of Embodiment Function Relations in Testing Activities. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design* 1 (1), 1503–1512. doi:10.1017/dsi.2019.156
- Grauberger, P., Wessels, H., Gladysz, B., Bursac, N., Matthiesen, S. & Albers, A. (2020). The contact and channel approach – 20 years of application experience in product engineering. *Journal of Engineering Design* 31 (5), 241–265. doi:10.1080/09544828.2019.1699035
- Hoelz, K., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2020a). Investigation of failure behavior in thread contact of wood-screws during the pull-out process. *STENG (Journal of Structural Engineering)* (146), 1–13. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002784
- Hoelz, K., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2020b). Methodical support for the investigation of system behaviour with analysis techniques - Overcoming the non-transparency in embodiment design. *Forschung im Ingenieurwesen* 84, 323–331. doi:10.1007/s10010-020-00417-y
- Matthiesen, S., Bruchmueller, T., Grauberger, P. & Wettstein, A. (2015). Modellunterstützte Reduktion von Störgrößen in einem Messsystem zur Erfassung der Geräte-Werkstück-Wechselwirkungen. In *26th Symposium Design for X*. Herrsching.
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Bremer, F. & Nowoseltschenko, K. (2019). Product Models in Embodiment Design - An Investigation of Challenges and Possibilities. *Springer Nature Applied Sciences* 1 (1087), 1–11. doi:10.1007/s42452-019-1115-y
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Hölz, K., Nelius, T., Bremer, F., Wettstein, A., Gesinger, A., Pflegler, B., Nowoseltschenko, K. & Voß, K. (2018). *Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse und Synthese* (KIT Scientific Working Papers Nr. 58), Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.

- Matthiesen, S., Grauberger, P., Nelius, T. & Hölz, K. (2017). *Methodische Unterstützung des Erkenntnisgewinns in der Produktentwicklung durch Konstruktionshypothesen* (KIT Scientific Working Papers Nr. 61), Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.
- Matthiesen, S., Grauberger, P. & Schrempp, L. (2019). Extended Sequence Modelling in Design Engineering – Gaining and Documenting Knowledge about Embodiment Function Relations with the C&C²-Approach. In *22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*. Delft, Niederlande.
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Sturm, C. & Steck, M. (2018). From Reality to Simulation – Using the C&C²-Approach to Support the Modelling of a Dynamic System. In *Procedia CIRP* (Bd. 70, S. 475–480). Elsevier B.V.
- Matthiesen, S., Grauberger, P. & Windisch, E. (2020). Erkenntnisgewinn in der Gestaltung mit Rapid Prototyping Ersatzsystemen durch Modellbildung und Parametertransformation. In *Konstruktion für die Additive Fertigung* (S. 145–164). Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Matthiesen, S., Gwosch, T., Mangold, S., Grauberger, P., Steck, M. & Cersowsky, S. (2017). Frontloading in der Produktentwicklung von Power-Tools durch frühe Validierung mit Hilfe von leistungsskalierten Prototypen. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017*. Stuttgart.
- Matthiesen, S., Hoelz, K. & Grauberger, P. (2017). Systemverständnis durch Analysemethoden. In *28. DFX Symposium*. Bamberg.
- Matthiesen, S., Wettstein, A. & Grauberger, P. (2018). Analysis of dynamic system behaviour using sequence modelling with the C&C²-Approach – a case study on a power tool hammer mechanism. In *NordDesign 2018*. Linköping, Schweden.
- Matthiesen, S., Wilhelm, M., Grauberger, P., Naue, I. & Werner, T. (2019). Erkenntnisgewinn durch Systemanalyse und Testing – Ein Ansatz zur Unterstützung der Entwicklung von Systemen mit neuartigen Wirkprinzipien. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2019*. Stuttgart.
- Nelius, T., Eisenmann, M., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021a). Tatort Technik (Teil 1) – Herausforderungen bei der Problemanalyse in der Konstruktion. *Konstruktion* 73 (03), 70–74. doi:10.37544/0720-5953-2021-03-70
- Nelius, T., Eisenmann, M., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021b). Tatort Technik (Teil 2) – Unterstützung bei der Problemanalyse in der Konstruktion mit der Design-ACH-Methode/Support for Problem Analysis in Engineering Design –

the Design-ACH Method. *Konstruktion* 73 (04), 70–74. doi:10.37544/0720-5953-2021-04-70

Wessels, H., Heimicke, J., Rapp, S., Grauberger, P., Richter, T., Matthiesen, S. & Albert, A. (2019). Sprintplanung in der Mechatroniksystementwicklung auf Basis von Referenzsystemelementen. In *17. gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2019: Agile Entwicklung physikalischer Produkte*. Aachen.

Wettstein, A., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021). Modelling and Parameter Identification of a Dynamic Mechanical System Using Sequence Modelling of Embodiment Function Relations with the C&C²-Approach – a Case Study on a Hammer Mechanism of an Impact Wrench. *Springer Nature Applied Sciences* 3 (128), 1–17. doi:10.1007/s42452-021-04149-8

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: **Patric Grauberger**

Geburtsdatum: **13.07.1987 in Filderstadt**

Staatsangehörigkeit: **deutsch**

Familienstand: **verheiratet**

Bildungsgang

1994 – 2007 Freie Waldorfschule Ravensburg (allg. Hochschulreife)

2007 – 2008 Freiwilliges ökologisches Jahr als Zivildienstersatz
2008 – 2010 Ausbildung zum Landwirt

2010 – 2016 Studium Maschinenbau (M.Sc.) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Seit 2016 Promotion im Themenfeld qualitative Modellbildung in der Gestaltung

Berufstätigkeit

2011 – 2016 Hilfwissenschaftlicher Mitarbeiter,
IPEK -Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie

2013 Industriepraktikum bei der Bosch-Rexroth AG
Abteilung Lineartechnik

Seit 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
IPEK - Institut für Produktentwicklung,
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
08/2017 – 09/2021 Forschungsfeldkoordinator des Forschungsfelds C&C²-A – Gestalt-Funktion-Zusammenhänge in der Konstruktion