

Matthias Eisenmann

**Validierungs-Navigator –
ein Referenzprozess für Validierungsstudien
zur Wirkung von Konstruktionsmethoden**

Validation Navigator – a reference process for
validation studies on effects of design methods

Band 157

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Matthias Eisenmann

**Validierungs-Navigator – ein Referenzprozess für
Validierungsstudien zur Wirkung von Konstruktions-
methoden**

Validation Navigator – a reference process for validation
studies on effects of design methods

Band 157

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright: IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2023
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

Validierungs-Navigator – ein Referenzprozess für Validierungsstudien zur Wirkung von Konstruktionsmethoden

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

Matthias Eisenmann

Tag der mündlichen Prüfung: 26.09.2022

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause

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

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 157

Konstruktionsmethoden haben das Ziel, das Denken und Handeln von Konstrukteuren zu beeinflussen. Seit mehr als 50 Jahren werden Konstruktionsmethoden auf der Grundlage sich wandelnder Ansätze und unter Einbezug verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen entwickelt. Innerhalb der Wissenschaftscommunity rund um die Erforschung von Konstruktionsmethoden besteht bisher kein Konsens darüber, wie Konstruktionsmethoden auf ihre Wirksamkeit untersucht werden sollen und welche Kriterien für eine erfolgreiche Validierung erfüllt werden müssen. Um Konstruktionsmethoden zu validieren, braucht es Forschungsansätze, die die Wirksamkeit der Konstruktionsmethoden messbar machen. Häufig werden Konstruktionsmethoden in einem kontrollierten Laborumfeld validiert, was eine hohe interne Validität und damit Belastbarkeit der Ergebnisse begünstigt. Allerdings wird eine Übertragung auf die Praxis erschwert, da die Komplexität eines Unternehmensprozesses reduziert werden muss. Im Gegensatz dazu leisten Feldstudien in realen Unternehmenskontexten einen hohen Beitrag zur Praxisrelevanz, erschweren aber die Vergleichbarkeit von Konstruktionsmethoden durch sich ständig ändernde Randbedingungen und Störgrößen.

Die Validierung von Konstruktionsmethoden stellt also seit Jahrzehnten eine große Herausforderung für die Forschung an Konstruktionsmethoden dar. Diesem Thema widmet sich die vorgelegte Arbeit, die einen Referenzprozess für Validierungsstudien zur Wirkung von Konstruktionsmethoden vorstellt. Der von Herrn Matthias Eisenmann entwickelte Referenzprozess soll die Validierung der Wirkung adressieren und sich auf die Prüfung der Erfolgskriterien Anwendbarkeit und Wirksamkeit fokussieren. Der Referenzprozess für die empirische Validierung der Wirkung von Konstruktionsmethoden besteht dabei aus einer qualitativen Studie mit Fokus auf Anwendbarkeit und einer quantitativen Studie mit Fokus auf Wirksamkeit. Die durch den Validierungs-Navigator beschriebene Vorgehensweise gibt auf der Betrachtungsebene des Forschungsdesigns zur Validierung der Wirkung eine Struktur vor. Erstmals werden durch den Referenzprozess auch die Erhebungsmethoden, zugehörige Variablen und ihre Entwicklung explizit einbezogen. Damit wird für die Konstruktionsforschung ein Ansatzpunkt für einen Standard für Forschungsmethoden geliefert, der eine Orientierung im Aufbau von Validierungsstudien ermöglicht. Die Etablierung eines solchen Standards ist für eine gute Vergleichbarkeit unbedingt notwendig. Matthias Eisenmann zeigt auf, wie Konstruktionsmethoden aktuell im Hinblick auf Vergleichbarkeit von Studien validiert werden, entwickelt den Referenzprozess „Validierungs-Navigator“ und evaluiert den Validierungs-Navigator in einer sehr gekonnt durchgeführten deskriptiven Studie entlang zweier Stimuli.

Kurzfassung

Konstruktionsmethoden sind ein Kernergebnis der Konstruktionsforschung und sollten vor ihrer Einführung und Verbreitung in Unternehmen validiert werden. In der Konstruktionsforschung fehlt bisher ein Standard für Forschungsmethoden als Orientierung für den Aufbau von Validierungsstudien sowie für die Datenerhebung und -auswertung. Für die Etablierung eines solchen Standards ist eine Referenz notwendig, um vergleichbare Studien zu ermöglichen. Auf die vergleichbare Umsetzung einzelner Validierungsstudien im Detail und die Operationalisierung von Erfolgskriterien gehen bestehende Ansätze nicht ein, weshalb sie nicht als Referenz für den Aufbau einzelner Studien geeignet sind. Wie Validierungsstudien in der aktuellen Forschungspraxis durchgeführt werden und wie eine Vergleichbarkeit zwischen diesen Studien hergestellt werden kann, ist zudem nicht explizit bekannt.

Zur Untersuchung der aktuellen Forschungspraxis wurde eine systematische Literaturstudie durchgeführt. Durch eine Kategorisierung aktueller Validierungsstudien in Bezug auf Schritte in der Validierung und die Art des verwendeten Studiendesigns wurde sichtbar, dass Studien in verschiedenen Validierungsschritten bisher nur wenig vergleichbar sind. Eine Analyse der kategorisierten Studien zeigte Herausforderungen in der Vergleichbarkeit der Konstruktionsmethoden selbst sowie der Umsetzung der Validierungsstudien. Strategien für eine höhere Vergleichbarkeit in aktuellen Validierungsstudien umfassen die Anknüpfung an bestehende Theorie, eine einheitliche Zielsetzung mit zugehörigen Variablen für Klassen von Konstruktionsmethoden sowie die Nutzung etablierter Modelle und Werkzeuge für den Aufbau von Validierungsstudien.

Die Erkenntnisse aus der Literaturstudie wurden genutzt, um den Referenzprozess *Validierungs-Navigator* zu entwickeln, der eine Unterstützung für Forschende für den Aufbau vergleichbarer Validierungsstudien zur Wirkung von Konstruktionsmethoden bereitstellt. Im Referenzprozess werden Elemente aus bestehenden Ansätzen mit den in der Literaturstudie identifizierten Strategien kombiniert, um die Qualität und Vergleichbarkeit entstehender Validierungsstudien positiv zu beeinflussen. Der *Validierungs-Navigator* beschreibt zwei Studien, um zunächst ein qualitatives Verständnis aufzubauen, bevor eine quantitative Untersuchung stattfindet, und berücksichtigt die aufeinander aufbauenden Erfolgskriterien *Anwendbarkeit* und *Wirksamkeit*.

Der *Validierungs-Navigator* wurde durch eine exemplarische Anwendung für den Aufbau von Validierungsstudien zur Wirkung einer Konstruktionsmethode evaluiert. Es konnten Beiträge zur Studienqualität geleistet werden, indem das Studiendesign sowie beinhaltete Erhebungsmethoden und Stimuli kontinuierlich weiterentwickelt wurden. Auf die Vergleichbarkeit der zur Validierung eingesetzten Variablen, der Zielsetzung und Vorgehensweise der untersuchten Konstruktionsmethode sowie der Operationalisierung der Erfolgskriterien konnte ein positiver Einfluss erzielt werden.

Abstract

Design methods are a central result of design research and should be validated before they are introduced and disseminated in the industry. In design research, a standard for research methods as orientation for the design of validation studies as well as for data collection and analysis is missing so far. For the establishment of such a standard, a reference is necessary to enable comparable studies. Existing approaches do not address the comparable implementation of individual validation studies in detail and the operationalisation of success criteria, which is why they are not suitable as a reference for the design of individual studies. Furthermore, it is not known explicitly how validation studies are conducted in current research practice and how comparability between these studies can be established.

A systematic literature review was conducted to investigate current research practice. By categorising current validation studies in terms of steps in validation and the type of study design used, it became visible that studies in different validation steps are so far only rarely comparable. An analysis of the categorised studies revealed challenges regarding the comparability of the design methods themselves as well as the implementation of the validation studies. Strategies for increasing comparability in current validation studies include connection to existing theory, common objectives with associated variables for classes of design methods, and the use of established models and tools for the setup of validation studies.

The findings from the literature study were used to develop the reference process *Validation Navigator*, which provides support for researchers in setting up comparable validation studies on the effects of design methods. The process combines elements from existing approaches with the strategies identified in the literature study to positively influence the quality and comparability of the resulting validation studies. The *Validation Navigator* describes two studies to first build up a qualitative understanding before a quantitative investigation takes place and considers the success criteria *applicability* and *efficacy* which build on each other.

The *Validation Navigator* was evaluated through an exemplary application for the setup of validation studies on the effects of a design method. Contributions to the quality of the study could be made by continuously developing the study design as well as the data collection methods and stimuli included. A positive influence could be achieved on the comparability of the variables used for validation, the objective and procedure of the investigated design method as well as the operationalisation of the success criteria.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen, der meine Begeisterung für die Konstruktionsmethodik und die Lehre sowie für deren Wirkungen auf das Denken und Handeln teilt. Durch die vielen, angeregten Diskussionen – egal ob zu Forschungs- oder Konstruktionsmethodik oder auch zu deren Vermittlung in der Lehre – konnte ich mich über die gesamte Zeit am Institut stetig weiterentwickeln.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause danke ich zum einen für die Übernahme des Korreferats und zum anderen dafür, dass er durch seine Initiative für ein gemeinsames Forschungsprojekt die Entstehung dieser Arbeit erst möglich gemacht hat.

Dem gesamten IPEK-Team und insbesondere der Forschungsgruppe Konstruktionsmethodik danke ich für die tolle Zusammenarbeit sowie für die vielen fachlichen Diskussionen. Bei der Forschungsgruppe Konstruktionsmethodik möchte ich mich zusätzlich für die tolle Arbeitsatmosphäre und den festen Zusammenhalt im Team bedanken. Besonders danken möchte ich außerdem Patric Grauberger für die gemeinschaftliche Forschungsarbeit, welche die empirischen Studien in dieser Arbeit erst möglich gemacht hat. Darüber hinaus möchte ich mich bei Thomas Nelius für die unzähligen Diskussionen und den intensiven Austausch zu meiner Forschungsarbeit und weit darüber hinaus danken, die dich mich als Forscher und als Person weitergebracht haben.

Außerdem möchte ich allen danken, die an meinen Studien teilgenommen haben. Auch wenn einige meiner Studien nicht Teil dieser Arbeit geworden sind, haben sie mir vielfältige Erfahrungen ermöglicht. Nur durch diese Erfahrungen war ich den Herausforderungen dieser Forschungsarbeit gewachsen.

Ganz besonders herzlich danke ich meiner Familie, die mich über meinen gesamten Werdegang von Schule über Studium bis zur Promotion unterstützt und gefördert hat. Meiner Frau Ramona danke ich von ganzem Herzen für Unterstützung, Rückhalt sowie das immense Verständnis und Vertrauen auch in schwierigen und anstrengenden Phasen. Zuletzt möchte ich meiner Tochter Fiona dafür danken, dass sie mir die Motivation gegeben hat, meine Forschungsarbeit ins Ziel zu bringen.

Karlsruhe, Oktober 2022

Matthias Eisenmann

“A method guides and challenges designers to consider things outside of their intuition and preconceptions; they were never meant to enslave the designer in a mechanical process where their judgment has no value.”

Peter Lloyd, 2019, Editorial *Design Studies*

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Danksagung	v
Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1 Grundlagen und Definitionen zu empirischen Studien in der Konstruktionsforschung	3
2.1.1 Forschungsmethoden – Klassifikation und Definitionen.....	5
2.1.2 Operationalisierung	7
2.1.3 Standardisierung von Methoden durch Referenzen.....	9
2.1.4 Zwischenfazit.....	10
2.2 Grundlagen zu Konstruktionsmethoden.....	10
2.2.1 Abgrenzung zu anderen Typen von Unterstützung.....	11
2.2.2 Bestandteile von Konstruktionsmethoden.....	13
2.2.3 Zwischenfazit.....	13
2.3 Ansätze zur Validierung von Konstruktionsmethoden.....	14
2.3.1 DRM – A Design Research Methodology	14
2.3.2 iDSDM – integrated Design Support Development Model	19
2.3.3 Validation Square	22
2.3.4 Nutzung von Forschungsmethoden aus anderen Disziplinen	27
2.3.5 Zwischenfazit.....	28
2.4 Erfolgskriterien für die Validierung von Konstruktionsmethoden	30
2.4.1 Anwendbarkeit.....	31
2.4.2 Nutzen.....	33
2.4.3 Akzeptanz.....	35
2.4.4 Zwischenfazit.....	37
2.5 Fazit zum Stand der Forschung.....	38

3	Motivation und Zielsetzung	41
3.1	Motivation	41
3.2	Zielsetzung	43
4	Forschungsfragen und Forschungsdesign.....	45
4.1	Forschungsfragen.....	45
4.2	Forschungsdesign und angestrebte Ergebnisse	46
5	Erste deskriptive Studie – Analyse der aktuellen Methodendvalidierung..	49
5.1	Vorgehensweise für die Literaturstudie	49
5.1.1	Auswahl und Systematische Kategorisierung.....	50
5.1.2	Review kategorisierter Studien.....	56
5.2	Ergebnisse und Diskussion.....	57
5.2.1	Überblick der aktuellen Forschungspraxis.....	58
5.2.2	Herausforderungen und Strategien zu deren Überwindung	61
5.2.3	Einschränkungen der ersten deskriptiven Studie	75
5.3	Fazit zur ersten deskriptiven Studie	75
6	Präskriptive Studie – Entwicklung eines Referenzprozesses.....	79
6.1	Festlegung des Anwendungsbereichs	79
6.2	Synthese des übergeordneten Referenzprozesses.....	81
6.2.1	Soll-Prozess für die Validierung der Wirkung	82
6.2.2	Evolution der Konstruktionsmethode in der Validierung	86
6.2.3	Co-Evolution von Konstruktions- und Forschungsmethode.....	88
6.2.4	Zwischenfazit zum Referenzprozess.....	90
6.3	Synthese der Detailprozesse für qualitative und quantitative Studien... 91	
6.3.1	Detailprozess für qualitative Studien mit Fokus Anwendbarkeit 92	
6.3.2	Detailprozess für quantitative Studien mit Fokus Wirksamkeit 100	
6.4	Fazit zur präskriptiven Studie.....	107
6.4.1	Beitrag zur Studienqualität	108
6.4.2	Beitrag zur Vergleichbarkeit von Validierungsstudien.....	109
6.4.3	Potentieller Beitrag zur Standardisierung.....	110
7	Zweite deskriptive Studie – Evaluation des Referenzprozesses	111
7.1	Fallbeispiel zur qualitativen Modellbildung	111
7.1.1	Ausgangssituation Konstruktionsmethode	112
7.1.2	Einbettung in den Prozess der Methodendvalidierung	113
7.1.3	Grundstruktur Studiendesign.....	115
7.1.4	Fazit zum Fallbeispiel – Status der Validierung.....	117
7.2	Qualitative Studie mit Fokus Anwendbarkeit.....	118
7.2.1	Operationalisierung.....	118
7.2.2	Studiendesign und -durchführung	120
7.2.3	Interpretation der Studienergebnisse	121

7.2.4	Diskussion zur Eignung des Referenzprozesses	125
7.3	Quantitative Studie mit Fokus Wirksamkeit.....	127
7.3.1	Operationalisierung	127
7.3.2	Studiendesign und -durchführung.....	131
7.3.3	Interpretation der Studienergebnisse.....	134
7.3.4	Diskussion zur Eignung des Referenzprozesses	138
7.4	Fazit zur zweiten deskriptiven Studie – Reflexion zum Validierungs- Navigator.....	141
7.4.1	Einschränkungen der Evaluation	141
7.4.2	Einschätzung zur Eignung des Validierungs-Navigators.....	142
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
8.1	Zusammenfassung.....	147
8.2	Ausblick.....	149
	Literaturverzeichnis.....	I
	Glossar	XVII
	Anhang	XXI
A.1	Erste deskriptive Studie.....	XXI
A.1.1	Übersicht kategorisierter Studien.....	XXI
A.2	Zweite deskriptive Studie.....	XXIII
A.2.1	Einführung der Modellbildung mit C&C ² -A	XXIII
A.2.2	Methoden-Template für die Modellbildung mit C&C ² -A.....	XXV
A.2.3	Statistische Analyse in der quantitativen Studie.....	XXVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Visualisierung eines empirischen Forschungsprozesses zur Beantwortung einer wissenschaftlichen Fragestellung.	4
Abbildung 2.2:	Darstellung der Operationalisierung anhand der Art der Variable und am Beispiel des latenten Konstrukts <i>Intelligenz</i>	8
Abbildung 2.3:	<i>Reference</i> und <i>Impact Model</i> eines Forschungsvorhabens.....	16
Abbildung 2.4:	Prozess zur Entwicklung und Validierung von Konstruktionsunterstützung als Teil des <i>iDSDM</i>	20
Abbildung 2.5:	Der <i>Validation Square</i>	23
Abbildung 2.6:	Visualisierung der Zusammenhänge zwischen den Erfolgskriterien <i>Anwendbarkeit</i> , <i>Nutzen</i> und <i>Akzeptanz</i>	37
Abbildung 2.7:	Grafische Zusammenfassung des Stands der Forschung zur Validierung von Konstruktionsmethoden.	39
Abbildung 4.1:	Forschungsdesign der vorliegenden Arbeit	47
Abbildung 5.1:	Vorgehen für die zweistufige Literaturstudie zur Analyse der aktuellen Forschungspraxis	50
Abbildung 5.2:	Darstellung der Operationalisierung von <i>Quantität</i> und <i>Neuartigkeit</i> als Anteile der <i>Kreativität</i>	62
Abbildung 5.3:	Darstellung der Wirkungsbereiche von Strategien für eine höhere Vergleichbarkeit von Validierungsstudien.	77
Abbildung 6.1:	Anwendungsbereich für den Referenzprozess in den Schritten zur Validierung von Konstruktionsmethoden.	80
Abbildung 6.2:	Einbettung der Validierung der Wirkung in die Schritte der Methodvalidierung.	83
Abbildung 6.3:	Soll-Prozess für die empirische Validierung der Wirkung von Konstruktionsmethoden.....	86
Abbildung 6.4:	Implementierung der möglichen Iterationen zur Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode.....	87
Abbildung 6.5:	Darstellung des Validierungs-Navigators – ein Referenzprozess für Validierungsstudien zur Wirkung von Konstruktionsmethoden.....	90
Abbildung 6.6:	Detailprozess für qualitative Studien zur Anwendbarkeit.	94

Abbildung 6.7:	Detailprozess für quantitative Studien mit Fokus auf <i>Wirksamkeit</i>	100
Abbildung 6.8:	Der entwickelte Referenzprozess <i>Validierungsnavigator</i>	108
Abbildung 7.1:	Modellbildung in der Analyse	112
Abbildung 7.2:	<i>Impact Model</i> zur Veranschaulichung der Auswirkungen der Konstruktionsmethode <i>Modellbildung mit C&C²-A</i>	114
Abbildung 7.3:	Grundstruktur des Studiendesigns zur Untersuchung der Wirksamkeit der Modellbildung mit C&C ² -A	116
Abbildung 7.4:	Entwicklung des Stimulus zum technischen System „Kartuschenpresse“ über die drei Iterationen der qualitativen Studie	122
Abbildung 7.5:	Visualisierung der Beiträge aus der Anwendung des Detailprozesses für qualitative Studien	125
Abbildung 7.6:	Auswahlmöglichkeiten für die Single-Choice Bewertung des Systemverhaltens des Stimulus „Rasthaken“.....	129
Abbildung 7.7:	Auswahlmöglichkeiten für die funktionsrelevanten Zustände des Stimulus „Rasthaken“	130
Abbildung 7.8:	Imagemap zur Auswahl funktionsrelevanter Bereiche des Stimulus zum technischen System „Kartuschenpresse“	131
Abbildung 7.9:	Ergebnisse der statistischen Analyse zum Einfluss der Modellbildung mit C&C ² -A auf das Systemverständnis auf Systemebene.....	134
Abbildung 7.10:	Auf Grundlage der Studienergebnisse überarbeitetes <i>Impact Model</i> zu den Wirkungen der Modellbildung mit C&C ² -A auf das Systemverständnis	136
Abbildung 7.11:	Visualisierung der Beiträge aus der Anwendung des Detailprozesses für quantitative Studien	138
Abbildung 7.12:	Visualisierung der Beiträge aus der Anwendung des Validierungs-Navigators in Bezug auf die Untersuchungsinhalte und Vorgehensweise. Wo Beiträge zur Studienqualität geleistet werden konnten ist in grün hervorgehoben, Beiträge zur Vergleichbarkeit in blau.	142
Abbildung A.2.1:	Merkblatt für die Einführung der Modellbildung mit C&C ² -A Teil 1.....	XXIII
Abbildung A.2.2:	Merkblatt für die Einführung der Modellbildung mit C&C ² -A Teil 2.....	XXIV

Abbildung A.2.3: Methoden-Template für die Modellbildung mit C&C ² -A Teil 1	XXV
Abbildung A.2.4: Methoden-Template für die Modellbildung mit C&C ² -A Teil 2	XXVI
Abbildung A.2.5: Ergebnisse des Mann-Whitney U Tests zum Einfluss der Gruppenteilung und der Durchgänge in der im Rahmen der zweiten deskriptiven Studie durchgeführten quantitativen Studie	XXIX
Abbildung A.2.6: Ergebnisse des Mann-Whitney U Tests zum Einfluss des Stimulus auf die Wirksamkeit in Bezug auf das Verständnis auf Systemebene.	XXX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Klassifikation verschiedener Forschungsmethoden nach Methodenklasse und Forschungsprozess.	6
Tabelle 2.2:	Abgrenzung der <i>Konstruktionsmethode</i> von anderen Typen der Unterstützung für die Konstruktion.	12
Tabelle 2.3:	Vergleich der Validierungsschritte innerhalb der verschiedenen Ansätze zur Validierung von Konstruktionsmethoden.....	29
Tabelle 5.1:	Kategorisierung von Validierungsschritten basierend auf der Konsolidierung in Tabelle 2.3	52
Tabelle 5.2:	Evidenzstufen für Validierungsstudien – Anpassung im Vergleich zu den Evidenzstufen für therapeutische Studien	54
Tabelle 5.3:	Übersicht zur Anzahl der Beiträge nach der Suche und nach dem Auswahlverfahren.....	58
Tabelle 5.4:	Ergebnisse der Kategorisierung von Validierungsstudien.....	59
Tabelle 6.1:	Aufbau der Kapitel zur Beschreibung der Detailprozesse.....	92
Tabelle 7.1:	Übersicht der Teststatistik zur Prüfung des Einflusses der Modellbildung mit C&C ² -A auf das Systemverständnis auf der Detailebene.	135
Tabelle A.1.1:	Kategorisierung der im Rahmen der ersten deskriptiven Studie identifizierten Validierungsstudien.	XXI
Tabelle A.2.2:	Übersicht zur statistischen Analyse der erhobenen Daten in der quantitativen Studie.....	XXVII

Abkürzungsverzeichnis

C&C ² -A	Contact and Channel Ansatz
C&C ² -M	Contact and Channel Modell
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DRM	Design Research Methodology
DSM	Design Structure Matrix
FBS	Function-Behaviour-Structure
IJD	International Journal of Design
iDSDM	integrated Design Support Development Model
iPeM	integriertes Produktentstehungsmodell
JED	Journal of Engineering Design
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
RCT	Randomized Controlled Trial
RIED	Research in Engineering Design

1 Einleitung

Konstruktionsmethoden stellen einen wichtigen Beitrag für den Erfolg in der Konstruktion dar (Beate Bender & Gericke, 2021; Cross, 2008; Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017). Daher ist es ein zentrales Ziel der Konstruktionsforschung, geeignete Konstruktionsmethoden zu entwickeln und für die Praxis bereitzustellen (Blessing & Chakrabarti, 2009). Bisher besteht jedoch kein Konsens dazu, wie Konstruktionsmethoden vor ihrer Einführung validiert werden sollen (Gericke et al., 2017).

Seit mehr als 50 Jahren werden Konstruktionsmethoden auf der Grundlage sich wandelnder Ansätze und unter dem Einbezug verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen entwickelt (Cross, 2007). Die Ansätze zur Entwicklung von Konstruktionsmethoden sind dabei sehr unterschiedlich. Es können zum einen theoretische Grundlagen aus verschiedenen Fachdisziplinen zum Einsatz kommen. Zum anderen können explizit gemachte erfolgreiche Denk- und Vorgehensweisen von erfahrenen Konstruierenden die Basis für eine Konstruktionsmethode bilden. Unabhängig vom zur Entwicklung verwendeten Ansatz verfolgen Konstruktionsmethoden dabei das Ziel, das Denken und Handeln von Konstruierenden zu beeinflussen.

Als ein Kernergebnis der Konstruktionswissenschaft, dessen Ziel die Beeinflussung von Konstruierenden ist, sollten Konstruktionsmethoden vor ihrer Einführung validiert werden. Durch die unterschiedlichen Ansätze zur Entwicklung von Konstruktionsmethoden entsteht jedoch eine Unklarheit darüber, welche Kriterien für eine erfolgreiche Validierung erfüllt werden sollen (Reich, 2010). Erschwerend kommt die individuelle Zielsetzung von Konstruktionsmethoden und die Unklarheit über anzuwendende Forschungsmethoden zu ihrer Validierung hinzu.

Zusätzlich ist unklar, welcher Forschungsansatz für eine Validierung zielführend ist. Werden Konstruktionsmethoden in einem kontrollierten Laborumfeld validiert, können ihre Wirkungen auf Konstruierende unter Minimierung von Störeffekten erfasst werden. Daher begünstigt eine solche Untersuchung eine hohe interne Validität und damit Belastbarkeit der Ergebnisse. Durch die Reduktion des Kontextes auf ein kontrolliertes Laborumfeld wird allerdings ein Übertrag auf die Praxis erschwert. Feldstudien im realen Unternehmenskontext können einen Beitrag zur Praxisrelevanz leisten und die Wirkungen von Konstruktionsmethoden im realen Kontext sichtbar machen. Konstruktionsprozesse im Unternehmen sind jedoch einzigartig und stehen unter dem Einfluss vielfältiger – oft unbekannter – Störgrößen. Vermaas (2016)

argumentiert aus diesem Grund, dass Experimente zur Validierung von Konstruktionsmethoden in der Praxis unmöglich sind. Dieser Argumentation folgend ist die interne Validität von Feldstudien zum Zusammenhang zwischen der Anwendung einer Konstruktionsmethode und beobachteten Wirkungen stark eingeschränkt.

Die Unklarheit über angemessene Kriterien und Forschungsansätze für die Validierung stellt eine Herausforderung für Forschende dar. Aus der Unklarheit resultiert eine Vielfalt individueller Zielsetzungen und Vorgehensweisen, die bestehende Untersuchungen in Bezug auf Inhalt und Vorgehensweise wenig vergleichbar macht. Als Orientierung könnte hier ein Standard dienen. Die Etablierung solcher Standards für die Forschung ist seit 2019 in den Leitlinien zur guten wissenschaftlichen Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) verankert:

„Die Etablierung von Standards bei [Forschungs-] Methoden, bei der Anwendung von Software, der Erhebung von Forschungsdaten sowie der Beschreibung von Forschungsergebnissen bildet eine wesentliche Voraussetzung für die Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit von Forschungsergebnissen.“ (DFG, 2019)

Standards für Forschungsmethoden sind allerdings in der Konstruktionsforschung aktuell nur wenig etabliert. Eine Literaturstudie von Vasconcelos und Crilly (2016) illustriert dies eindrücklich: Die Autoren identifizieren für ein und dasselbe Phänomen *Designfixierung* (design fixation) in 25 Studien 14 unterschiedliche erhobene Variablen und eine große Vielfalt an angewendeten Forschungsmethoden. Dieser Mangel an Standards führt zu einer geringen Vergleichbarkeit von Studien, was das Zusammenführen verschiedener Forschungsergebnisse und die Ableitung übergeordneter Erkenntnisse erschwert. Ein Referenzprozess kann die Grundlage für einen Standard im Forschungsdesign bilden (vgl. Kapitel 2.1).

Daher verfolgt diese Arbeit das Ziel, einen Referenzprozess für die Validierung von Konstruktionsmethoden zu entwickeln.

Dazu werden in Kapitel 2 die Grundlagen und der Stand der Forschung zur Validierung von Konstruktionsmethoden analysiert, um darauf aufbauend in Kapitel 3 eine konkretisierte Zielsetzung abgeleitet. Kapitel 4 beschreibt anschließend der Zielsetzung zugeordnete Forschungsfragen und das gewählte Vorgehen, um diese zu beantworten. In Kapitel 5 wird durch eine Literaturstudie ein Überblick zur aktuellen Forschungspraxis erarbeitet. In Kapitel 6 wird auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse die Entwicklung eines Referenzprozesses beschrieben. Die Evaluation des Referenzprozesses ist Gegenstand von Kapitel 7. Abschließend wird die Arbeit in Kapitel 8 zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Forschung gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden in dieser Arbeit genutzte Grundlagen und der Stand der Forschung zur Validierung von Konstruktionsmethoden dargelegt. Konstruktionsmethoden sollen das Denken und Handeln von Konstruierenden beeinflussen. Deshalb sind empirische Studien mit Probanden notwendig, um die Auswirkungen der Anwendung von Konstruktionsmethoden untersuchen zu können. Kapitel 2.1 erläutert zunächst Grundlagen zu empirischen Studien in der Konstruktionsforschung. In Kapitel 2.2 werden Grundlagen zu Konstruktionsmethoden dargelegt, die eine Begriffsdefinition und eine Abgrenzung von anderen Typen von Konstruktionsunterstützung beinhalten. Anschließend werden in Kapitel 2.3 bestehende Ansätze zur Vorgehensweise in der Validierung von Konstruktionsmethoden beschrieben und konsolidiert. In Kapitel 2.4 werden bestehende Erfolgskriterien für die Validierung von Konstruktionsmethoden diskutiert. Kapitel 2.5 zieht ein Fazit und konkretisiert eine Forschungslücke, die in dieser Arbeit adressiert werden soll.

2.1 Grundlagen und Definitionen zu empirischen Studien in der Konstruktionsforschung

Das Beschreiben, Erklären und Beeinflussen gehört zu den Grundzielen wissenschaftlicher Tätigkeit (Hussy et al., 2013). In der Konstruktionsforschung sind empirische Studien notwendig, um reale Konstruktionsprozesse zu beschreiben und die den Beobachtungen zugrundeliegenden Ursachen und Wirkungen zu verstehen. Diese Beschreibung und Erklärung bildet die Grundlage für die zielgerichtete Beeinflussung von Konstruierenden und damit des Konstruktionsprozesses. Konstruktionsmethoden stellen eine Möglichkeit dar, die Konstruierenden ihrem Denken und Handeln zu beeinflussen (vgl. Kapitel 2.2).

Als Ausgangspunkt für den empirischen Forschungsprozess (siehe Abbildung 2.1) wird eine Fragestellung formuliert, die die Beschreibung, Erklärung, Beeinflussung oder eine Kombination dieser Ziele als Forschungsziel definiert. Die Beantwortung der Fragestellung erfordert in der Regel mehrere Studien mit unterschiedlicher Ausrichtung, die durch ein *Forschungsdesign* festgelegt werden. In den Studien können unterschiedliche Forschungsmethoden zum Einsatz kommen. Für jede Studie ist ein eigenes *Studiendesign* notwendig, das wiederum verschiedene (*Daten-*)*Erhebungs-* und *Analysemethoden* beinhalten kann (siehe Abbildung 2.1). Diese Forschungsmethoden werden in Kapitel 2.1.1 klassifiziert und genauer beschrieben.

Im Konstruktionsprozess entstehen technische Systeme, die die wirtschaftliche Grundlage eines Unternehmens bilden. Die Konstruktionsforschung befasst sich daher mit Fragestellungen, die auf eine Optimierung des Konstruktionsprozesses abzielen, um die Qualität der entstehenden Systeme sicherzustellen und den Prozess so effizient wie möglich zu gestalten. Dabei stehen die Konstruierenden als umsetzende Personen mit ihrem Denken und Handeln häufig im Fokus der Untersuchung. Sowohl die Qualität des technischen Systems als auch das Denken und Handeln der Konstruierenden unterliegen vielfältigen Einflüssen und lassen sich nicht direkt untersuchen. Soll zum Beispiel die *Funktionsqualität* des Systems oder das *Problemlöseverhalten* der Konstruierenden beeinflusst werden, müssen diese sogenannten *latenten Konstrukte* – die nicht direkt beobachtbar und durch verschiedene Einflüsse geprägt sind – zuerst genauer beschrieben und einer Untersuchung zugänglich gemacht werden.

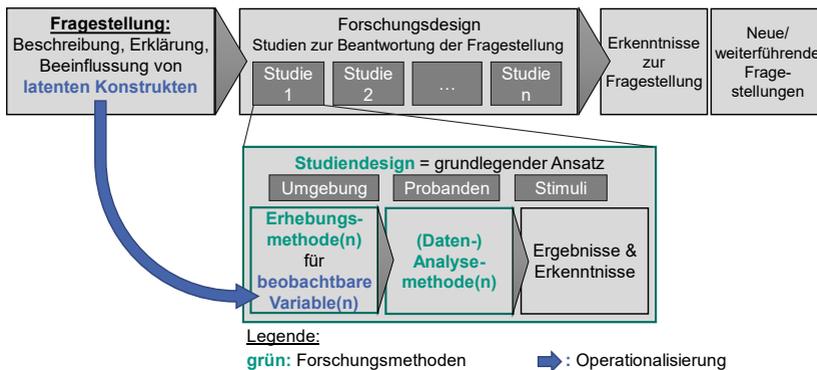


Abbildung 2.1: Visualisierung eines empirischen Forschungsprozesses zur Beantwortung einer wissenschaftlichen Fragestellung. Für wissenschaftliche Fragestellungen sind häufig mehrere Studien notwendig, die den Einsatz unterschiedlicher Forschungsmethoden erfordern (siehe Kapitel 2.1.1). Innerhalb des Studiendesigns einer Studie können dabei mehrere Erhebungs- und Analysemethoden zum Einsatz kommen. Zudem bezieht sich eine Fragestellung in vielen Fällen auf latente Konstrukte, die durch eine Operationalisierung in beobachtbare Variablen für eine empirische Untersuchung zugänglich gemacht werden müssen (siehe Kapitel 2.1.2).

Den Untersuchungsgegenstand innerhalb der Fragestellung bilden in der Konstruktionsforschung häufig solche *latenten Konstrukte*, die vor einer Untersuchung in *beobachtbare Variablen* operationalisiert werden müssen (siehe Abbildung 2.1). Die *Operationalisierung von latenten Konstrukten* wird in Kapitel 2.1.2 anhand eines Beispiels detaillierter erläutert.

2.1.1 Forschungsmethoden – Klassifikation und Definitionen

Forschungsmethoden beschreiben das Vorgehen zur Beantwortung wissenschaftlicher Fragestellungen (vgl. Hussy et al., 2013). Dabei haben sich in den verschiedenen Fachdisziplinen eigene Forschungsmethoden und Klassifikationen entwickelt. In der Konstruktionsforschung werden Forschungsmethoden aus verschiedenen Fachdisziplinen genutzt, um die vielfältigen Fragestellungen zu technischen Systemen, Menschen, Werkzeugen, Prozessen oder Organisationen adressieren zu können (Blessing & Chakrabarti, 2009). Für die Validierung von Konstruktionsmethoden müssen die Einflüsse der Konstruktionsmethoden auf das Denken und Handeln von Konstruierenden untersucht werden. In den Sozialwissenschaften wird das Denken und Handeln von Menschen erforscht. Daher soll hier eine Beschreibung zur Klassifikation von Forschungsmethoden aus den empirischen Sozialwissenschaften verwendet werden (siehe Tabelle 2.1).

Es wird zwischen den beiden Klassen *qualitative* und *quantitative Forschungsmethoden* unterschieden. *Qualitative Forschungsmethoden* werden zur Erhebung und Interpretation vorwiegend qualitativer – also nichtnumerischer – Daten verwendet. Ziel *qualitativer Forschungsmethoden* ist es, neue Effekte zu entdecken, neue Hypothesen und Theorien zu bilden oder auch Hypothesen zu prüfen (Bortz & Döring, 2006). *Qualitative Forschungsmethoden* dienen also vorwiegend dazu, ein Verständnis über den Untersuchungsgegenstand aufzubauen. *Quantitative Forschungsmethoden* „repräsentieren eine Vorgehensweise zur numerischen Darstellung empirischer Sachverhalte“ (Hussy et al., 2013, S. 20). Sie nutzen dazu vorwiegend quantitative – also numerische – Daten, um eine statistische Auswertung zu ermöglichen, Effekte zu quantifizieren und Hypothesen zu prüfen (Bortz & Döring, 2006).¹

¹ Für die beiden Klassen von Forschungsmethoden gelten jeweils eigene Gütekriterien. Bei quantitativen Forschungsmethoden sind Objektivität, Reliabilität und Validität die anerkannten Hauptgütekriterien. Zu Gütekriterien qualitativer Forschungsmethoden existieren unterschiedliche Ansichten. Weiterführende Informationen zu Gütekriterien geben z.B. Hussy et al. (2013) oder Bortz und Döring (2006).

Tabelle 2.1: Klassifikation verschiedener Forschungsmethoden nach Methodenklasse und Forschungsprozess. Die Darstellung ist angelehnt an Hussy et al. (2013, S. 28). Die genannten Forschungsmethoden sind als typische Beispiele und nicht als vollständige Liste zu sehen.

Methodenklasse	Quantitativ	Qualitativ
Studien- design ²	(Labor-)Experiment	Deskriptive Feldforschung
	Korrelationsstudie	Qualitatives Experiment
	Metaanalyse	Biografische Methode

(Daten-) Erhebungsmethoden	Beobachten	Teilnehmendes Beobachten
	Zählen	Interview
	Testen (z.B. durch IQ-Test)	Gruppendiskussion

(Daten-) Analysemethoden	Beschreibende Methoden	Inhaltsanalyse
	Signifikanztests	Codieren

Hussy et al. (2013) treffen zudem die Einordnung von Forschungsmethoden nach dem Ablauf des Aufbaus von Studien (siehe Tabelle 2.1). Zuerst wird das *Studiendesign* entsprechend einer Fragestellung ausgewählt, das die grundlegende Vorgehensweise zur Beantwortung der Fragestellung widerspiegelt. Soll beispielsweise eine Hypothese geprüft werden, ist das *Experiment* ein geeignetes *Studiendesign*. Das *Studiendesign* gibt einen Rahmen für eine einzelne Studie. Die Beschreibung des *Studiendesigns* beinhaltet damit sowohl die Studienumgebung, die modellhaft einen Kontext abbildet, als auch die Auswahl von Probanden und gegebenenfalls Stimuli, die diese Probanden innerhalb der Studie zu einer Reaktion anregen sollen (vgl. Abbildung 2.1).

Innerhalb des *Studiendesigns* beschreiben *Erhebungsmethoden* und *Analysemethoden* im Detail, wie Daten erhoben und ausgewertet werden. Die Wahl eines bestimmten

² Im Original: Forschungsdesign. Im Rahmen dieser Arbeit soll das Forschungsdesign nach Hussy et al. (2013) als *Studiendesign* bezeichnet werden, um es vom *Forschungsdesign* als Abfolge verschiedener Studien innerhalb eines Forschungsprozesses (vgl. Abbildung 2.1) abzugrenzen.

Studiendesigns schränkt die Auswahl geeigneter *Erhebungs-* und *Analysemethoden* ein. (*Daten-*)*Erhebungsmethoden* sollten für die zu erhebenden Variablen geeignet sein. Werden quantitative Forschungsmethoden angewandt, werden die Daten häufig statistisch analysiert, bei qualitativen Forschungsmethoden wird häufiger der den Daten zugrundeliegende Inhalt durch die Analyse direkt interpretiert.

2.1.2 Operationalisierung

Durch eine Operationalisierung werden abstrakten und damit nicht beobachtbaren, d.h. *latenten*, Variablen konkret mess- oder *beobachtbare Variablen* zugeordnet. Abstrakte Variablen können gleichzeitig auch komplex sein, wenn sie mehrere Aspekte umfassen. (Hussy et al., 2013) Komplexe *latente Variablen* werden zur Abgrenzung von den konkreteren *latenten Variablen* in dieser Arbeit als *latente Konstrukte*³ bezeichnet. Die *Intelligenz* ist ein Beispiel eines *latenten Konstrukts*, da sie verschiedene Aspekte des menschlichen Denkens – wie logisches Denken oder räumliches Vorstellungsvermögen und weitere – in sich vereint.

Die Vorgehensweise zur Operationalisierung kann am Beispiel *Intelligenz* verdeutlicht werden (siehe Abbildung 2.2). Die *Intelligenz* als *latentes Konstrukt* muss zunächst konkretisiert werden, indem das Konstrukt in einzelne Bestandteile zerlegt wird. Zur *Intelligenz* gehören unter anderem das *logische Denken* und das *räumliche Vorstellungsvermögen*. Diese Bestandteile stellen *latente Variablen* dar, die durch eine Zuordnung von *beobachtbaren Variablen* einer Erhebung zugänglich gemacht werden können. Im dargestellten Beispiel wird das *logische Denken* durch die *Fähigkeit, eine Aufgabe zum logischen Denken zu lösen* operationalisiert. Diese *beobachtbare Variable* kann durch einen Test mit Aufgaben zum logischen Denken erhoben werden und die in der Aufgabe erreichte Punktzahl als Wert zugeordnet werden. Durch einen Vergleich der Punktzahlen verschiedener Personen kann für jede Person ein spezifischer Wert für die *latente Variable logisches Denken* als Bestandteil von *Intelligenz* ermittelt werden. Dieser Zahlenwert ermöglicht eine Einschätzung dazu, ob die *Intelligenz* in Bezug auf *logisches Denken* einer Person über- oder unterdurchschnittlich ausgeprägt ist. Können verschiedene *latente Variablen* zum gleichen Konstrukt auf vergleichbare Weise operationalisiert werden, wird die Zusammenführung der einzelnen Werte zu einem Wert für das gesamte

³ *Konstrukt* ist ein ebenfalls gebräuchlicher Begriff in den empirischen Sozialwissenschaften für Variablen, die mehrere Aspekte in sich vereinen, vgl. Bortz und Döring (2006); Hussy et al. (2013)

Konstrukt möglich. Für die *Intelligenz* stellt der Intelligenzquotient einen solchen Wert dar, der die verschiedenen Bestandteile zu einem Wert kombiniert.

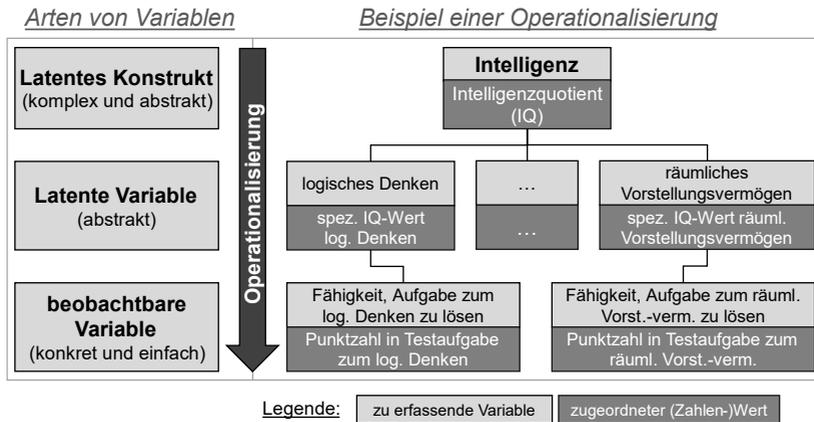


Abbildung 2.2: Darstellung der Operationalisierung anhand der Art der Variable und am Beispiel des latenten Konstrukts *Intelligenz*. Die Operationalisierung dient dazu, latente Konstrukte oder latente Variablen einer Beobachtung oder Messung zugänglich zu machen. Latente Konstrukte müssen dazu zunächst in konkretere Bestandteile (= latente Variablen) zerlegt und eine Handlung (= Operation) festgelegt werden, die die latente Variable in eine beobachtbare Variable überführt. Zusätzlich wird in der Operationalisierung das Erhebungsinstrument (im Beispiel der IQ-Test) und die Zuordnung von Werten zur Variablen (hier Punktzahl in der Testaufgabe) definiert.

Die Operationalisierung von latenten Konstrukten basiert auf Wissen und Theorien zum Untersuchungsgegenstand. Die Operationalisierung zielt darauf ab, *beobachtbare Variablen* zu identifizieren, die das *latente Konstrukt* möglichst gut abbilden können. (vgl. Bortz & Döring, 2006; Hussy et al., 2013) Dabei können für jedes Konstrukt unterschiedliche latente Variablen und für jede latente Variable wiederum verschiedene beobachtbare Variablen definiert werden. Im Fall der *Intelligenz* kann auf die Erfahrungen aus innerhalb mehrerer Jahrzehnte durchgeführter Studien und verschiedene Tests zurückgegriffen werden.

Die Unterteilung in *Konstrukt*, *latente Variable* und *beobachtbare Variable* ist dabei nicht trennscharf, sondern hängt von der Tiefe der Betrachtung ab. *Logisches Denken* kann als eine latente Variable für *Intelligenz* gesehen werden. Falls eine Untersuchung zum Ziel hat, die Einflüsse auf das *logische Denken* zu untersuchen kann die latente Variable *logisches Denken* als Konstrukt betrachtet und noch feingranularer operationalisiert werden.

Die Operationalisierung ist zudem eng verknüpft mit der Auswahl von *Erhebungs- und Analysemethoden* (siehe Kapitel 2.1.1). Durch das Festlegen eines zu erhebenden Werts wird gleichzeitig eine *Erhebungsmethode* und ggf. ein Erhebungsinstrument – wie der Fragebogen eines IQ-Tests – ausgewählt. Für die Interpretation der Ergebnisse aus der Erhebung werden außerdem je nach Zielsetzung der Untersuchung *Analysemethoden* definiert.

2.1.3 Standardisierung von Methoden durch Referenzen

Für Forschungsmethoden in den Ingenieurwissenschaften beschreibt die DFG in einem Kommentar zur Leitlinie 11 „Methoden und Standards“:

„Bezogen auf die Forschung im Ingenieurbereich ist eine Auslegung des Begriffs Standard im Sinne von Referenz zielführender. Diese Referenz ist als verlässlicher Vergleichsmaßstab zu verstehen, anhand dessen eine Einordnung von Forschungsergebnissen in Bezug auf den ‚Stand der Technik‘ vorgenommen werden kann. Verlässliche Vergleiche können in der Fachcommunity anerkannte experimentelle Herangehensweisen und Algorithmen sowie Daten aus Benchmarks sein.

Referenzen und die darauf aufbauenden Standards können in verschiedenen Stufen definiert sein: als Mindestanforderung an eine im Fach anerkannte Arbeitsmethodik, als bereits ausgearbeitetes Referenzmodell oder im letzten Schritt als formalisierte, von Organisationen wie ISO oder DIN beschlossene Norm.“ (DFG, 2020)

Aus Sicht der DFG können also Referenzen im Sinne von anerkannten Vorgehensweisen, Werkzeugen und Methoden eine Grundlage für einen Standard in Form einer Norm bilden. Ein Referenzmodell wird in diesem Zusammenhang als eine Vorstufe einer formalisierten Norm gesehen. Referenzmodelle sind vorwiegend Gegenstand der Forschung in der Wirtschaftsinformatik. Dort stellen Referenzmodelle Erkenntnisse und Vorgehensweisen so bereit, dass sie für die Gestaltung von Informationssystemen wiederverwendet werden können (vom Brocke, 2003). Eine spezielle Form solcher Referenzmodelle als Ausgangspunkt für eine Standardisierung von Prozessen bilden Referenzprozessmodelle (Czarniecki et al., 2013) – kurz Referenzprozesse.

Im Übertrag auf die Produktentwicklung beschreiben Wilmsen et al. (2019, S. 1675) einen Referenzprozess als „einen unternehmensspezifischen, generischen Prozess, der die üblichen Abfolgen von Aktivitäten, Methoden und Prozessen für die Entwicklung unterschiedlicher Produkte beschreibt“. Bernd Bender (2004) beschreibt außerdem, dass ein Referenzprozess nach Longmuß (2003) definiert, welche Konstruktionsmethoden in welchem Schritt des Produktentwicklungsprozesses als Standardmethoden eingesetzt werden sollen. Auf diese Weise wird die Auswahl einer geeigneten Konstruktionsmethode erleichtert.

2.1.4 Zwischenfazit

Typische Fragestellungen in der empirischen Konstruktionsforschung befassen sich mit der Beschreibung, Erklärung und Beeinflussung von latenten Konstrukten mit dem Ziel, den Konstruktionsprozess positiv beeinflussen zu können. Diese latenten Konstrukte müssen auf geeignete Weise in Form von beobachtbaren Variablen operationalisiert werden, um in Studien untersucht werden zu können. Für den Aufbau von empirischen Studien muss ein zur Fragestellung passendes Studiendesign festgelegt und darin beinhaltete Erhebungs- und Analysemethoden definiert werden. Dabei ist auf eine gute Passung zwischen den Erhebungs- und Analysemethoden mit den zu erhebenden beobachtbaren Variablen zu achten.

Mit Referenzprozessen können Standard-Konstruktionsmethoden für verschiedene Schritte des Produktentwicklungsprozesses so definiert werden, dass sie für die Entwicklung verschiedener Produkte wiederverwendet werden können. Übertragen auf die Validierung von Konstruktionsmethoden kann ein Referenzprozess dazu dienen, Standard-Forschungsmethoden für Schritte im Validierungsprozess zu definieren.

2.2 Grundlagen zu Konstruktionsmethoden

Unter dem Begriff „Konstruktionsmethode“ werden verschiedene Arten von Unterstützung für die Konstruktion verstanden. Daher soll in diesem Kapitel eine Konkretisierung vorgenommen werden, die den Betrachtungsbereich dieser Arbeit auf eine klar abzugrenzende Sichtweise auf Konstruktionsmethoden einschränkt. Dazu werden ausgewählte, möglichst aktuelle Referenzen genutzt. Kriterien für die Auswahl sind die Veröffentlichung in international anerkannten Journals und die Anzahl an Zitationen.

Für eine Definition des Begriffs *Konstruktionsmethode* wird die Beschreibung von Gericke et al. (2017, S. 105) ausgewählt:

[Eine Konstruktionsmethode ist] *“eine Spezifikation, wie ein bestimmtes Ergebnis erreicht werden soll. Dies kann Angaben dazu enthalten, wie Informationen dargestellt werden sollen, welche Informationen als Input für die Methode verwendet werden sollen, welche Werkzeuge verwendet werden sollen, welche Aktionen auf welche Weise durchgeführt werden sollen, wie die Aufgabe zerlegt werden soll und wie die Aktionen in eine Reihenfolge gebracht werden sollen.”*

2.2.1 Abgrenzung zu anderen Typen von Unterstützung

Die Konstruktion kann durch die Nutzung unterschiedlicher Konzepte unterstützt werden. Konstruktionsmethoden sind als eines dieser Konzepte zu sehen. Die Konzepte setzen eine Unterstützung auf unterschiedliche Art und Weise um, weshalb das Konzept *Konstruktionsmethode* von verwandten Konzepten abgegrenzt werden soll.

Ehrlenspiel und Meerkamm (2017, S. 173) beschreiben verschiedene Detailgrade, die eine Unterstützung einnehmen kann:

„[Konstruktions-] Methoden sind damit konkreter als die Strategien, unter denen man eher eine flexible Leitidee versteht [...] Werkzeuge sind noch konkretere Teilmethoden, sehr oft Computer-Werkzeuge, wie z. B. Simulationsmethoden FEM, BEM, MKS; [oder] Dokumentationsmethoden. Unter Hilfsmitteln schließlich kann man die körperlichen Objekte zur Abwicklung der Informationsverarbeitung des Entwickelns verstehen: z. B. Rechner, Zeichenbretter, Rapid Prototyping-Maschinen.“

Gericke et al. (2017) nehmen außerdem eine Abgrenzung zu *Methodik*, *Prozess*, *Richtlinie* und *Werkzeug* vor (siehe Tabelle 2.2). Aus der Abgrenzung wird klar, dass eine Konstruktionsmethode Teil einer Methodik sein kann. Außerdem wird deutlich, dass Konstruktionsmethoden eine Empfehlung für das Vorgehen und die Interpretation der während der Anwendung entstehender Ergebnisse geben. Diese Empfehlungen sollen jedoch nicht die Entscheidungen des Methodenanwenders ersetzen, sondern Aspekte aufzeigen, die bisher unbeachtet geblieben sind (Lloyd, 2019).

Tabelle 2.2: Abgrenzung der *Konstruktionsmethode* von anderen Typen der Unterstützung für die Konstruktion. Die Beschreibungen basieren auf Gericke et al. (2017) sowie Ehrlenspiel und Meerkamm (2017).

Unterstützung	Definition	Abgrenzung zu <i>Konstruktionsmethode</i>
Hilfsmittel	Körperliche Objekte zur Abwicklung der Informationsverarbeitung	Konstruktionsmethoden beschreiben ein Vorgehen, das die Nutzung von Hilfsmitteln beinhalten kann.
Werkzeug	Ein Objekt, Artefakt oder eine Software, die zur Durchführung einer Handlung verwendet wird. Ein Werkzeug kann für verschiedene Zwecke verwendet werden.	Eine Konstruktionsmethode verfolgt ein bestimmtes Ziel innerhalb der Konstruktion. Eine Konstruktionsmethode kann ein Werkzeug beinhalten, indem sie Anweisungen gibt, wie es zu verwenden ist und wann es im Prozess eingesetzt werden soll.
Richtlinie	Eine strenge Vorgabe von Aktivitäten zur Erreichung eines bestimmten Ziels. Gegen eine Leitlinie darf nur aus gutem Grund verstoßen werden.	Eine Richtlinie ist verbindlicher als eine Konstruktionsmethode, die eher Empfehlungen gibt.
Prozess	Eine formal festgelegte Abfolge von Aktivitäten, die bei der Entwicklung eines bestimmten Produkts oder einer Klasse von Produkten auszuführen sind.	Konstruktionsmethoden legen eher fest, wie einzelne Ergebnisse zu erreichen sind, und folgen nicht immer einer strengen Abfolge wie Prozesse. Auch zielen Methoden in der Regel nicht auf die Entwicklung eines gesamten Produkts ab, sondern unterstützen Schritte oder Phasen im Prozess.
Strategie	Eine flexible Leitidee für die Konstruktion	Konstruktionsmethoden sind konkreter, da sie eine Abfolge von Schritten vorgeben.
Methodik	Eine Methodik umfasst verschiedene Methoden und Denkweisen zu deren Anwendung. Sie kann Richtlinien und Prozesse beinhalten.	Eine Methodik ist wesentlich umfangreicher als eine einzelne Konstruktionsmethode.

2.2.2 Bestandteile von Konstruktionsmethoden

Gericke et al. (2017) beschreiben Elemente, die Bestandteile einer Beschreibung zu einer Konstruktionsmethode sein sollen. Die *Kernidee* beschreibt, worauf die Konstruktionsmethode beruht, also das Grundprinzip oder die zugrundeliegende Theorie. Zusätzlich soll die *Darstellung von Ergebnissen* aus der Methodenanwendung und ein Mittel für die Dokumentation definiert werden. Die *Vorgehensweise* soll in Form von einer Abfolge durchzuführender Aktivitäten beschrieben sein. Um eine Einordnung der Konstruktionsmethode in einen passenden Kontext zu ermöglichen, soll außerdem der *Verwendungszweck* spezifiziert werden. Darunter sind der Anwendungsbereich, die Abdeckung dieses Bereichs und der erwartete Nutzen zu verstehen.

Daalhuizen und Cash (2021) beschreiben die Entwicklung einer Theorie für die Bestandteile von Konstruktionsmethoden. Dabei definieren sie ähnliche Bestandteile wie Gericke et al. (2017). Demnach enthält eine Konstruktionsmethode eine Beschreibung des *Methodenziels* und der *Vorgehensweise* zur Erreichung dieses Ziels. Zusätzlich wird die Methode über ein schlüssiges *Grundprinzip* und eine zugehörige Definition des *Rahmens* in den Kontext für eine Anwendung eingeordnet. Die *Denkweise* bezieht zusätzlich Anknüpfungspunkte zur Einstellung und den Werten des Methodenanwenders mit ein.

Zusammengefasst lassen sich daraus folgende Bestandteile einer Beschreibung zu einer Konstruktionsmethode ableiten:

1. ein *Ziel*, das mit der *Vorgehensweise* verknüpft ist
2. eine *Vorgehensweise* bestehend aus einer Abfolge von Schritten und der anzuwendenden Werkzeuge und Hilfsmittel
3. den *Kontext* und *Wirkungsbereich* für die Anwendung

2.2.3 Zwischenfazit

Konstruktionsmethoden sind eine Form von Unterstützung für einzelne Schritte oder Phasen in der Konstruktion. Sie geben Hinweise, welche Aktivitäten in welcher Abfolge unter Zuhilfenahme welcher Werkzeuge und Hilfsmittel durchzuführen sind. Der übergeordnete Zweck von Konstruktionsmethoden ist dabei, eine Orientierung zu geben, welche Änderungen im Verhalten, der Denkweise oder der Nutzung und Interpretation von Informationen das Ergebnis des Schritts oder der Konstruktionsphase positiv beeinflussen können. Konstruktionsmethoden sind daher als eine empfehlende Beschreibung von Vorgehensweisen zu sehen, die das Denken und

Handeln von Konstruierenden unterstützen soll, ohne deren Handlungsspielraum unnötig einzuschränken (vgl. Lloyd, 2019).

2.3 Ansätze zur Validierung von Konstruktionsmethoden

In der Konstruktionsforschung bestehen bereits verschiedene Ansätze, die zur Validierung von Konstruktionsmethoden eingesetzt werden können. Im Folgenden werden bestehende Ansätze vorgestellt und im Hinblick auf die Zielstellung dieser Arbeit reflektiert. Auf diese Weise soll ein Überblick über durchzuführende Forschungsaktivitäten zur Validierung von Konstruktionsmethoden gewonnen werden. Als der auf Basis der Anzahl der Zitationen (>2000 Zitationen, Google Scholar, abgerufen am 07.12.2021) am häufigsten genutzte Ansatz wird die *Design Research Methodology (DRM)* (Blessing & Chakrabarti, 2009) zuerst vorgestellt und die weiteren Ansätze im Vergleich zur *DRM* diskutiert.

2.3.1 DRM – A Design Research Methodology

Die Beschreibungen in diesem Kapitel basieren auf „DRM – A Design Research Methodology“ (Blessing & Chakrabarti, 2009). Es handelt sich dabei um eine umfangreiche Beschreibung des Rahmens für die Konstruktionsforschung als Lehrbuch für Forschende. Für eine Vereinheitlichung möglicher Forschungsdesigns wird in der *DRM* eine Grundstruktur für Forschungsvorhaben in der Konstruktionsforschung beschrieben. Für die einzelnen Studien werden Empfehlungen für verschiedene Forschungsmethoden und Werkzeuge gegeben. Der Grundstruktur liegt die Annahme zugrunde, dass Konstruktionsforschung das übergeordnete Ziel verfolgt, die Konstruktionspraxis zu verbessern. Das erreicht die Konstruktionsforschung durch die Entwicklung von in der Praxis anwendbarer Unterstützung.

In *DRM* werden für die Konstruktionsforschung vier grundlegende Phasen definiert:

- 1) In der *Research Clarification* (Klärung des Forschungsziels) wird zunächst der Stand der Forschung gesichtet, strukturiert und eine Zielsetzung für das Forschungsvorhaben abgeleitet. Die Zielsetzung bezieht sich darauf, einen spezifischen Teil der Konstruktionspraxis zu verbessern.
- 2) In der *Descriptive Study I* (erste deskriptive Studie) soll durch Literaturrecherche und empirische Untersuchungen ein umfassendes Verständnis aufgebaut werden, um Einflussfaktoren innerhalb der Zielsetzung mög-

lichst genau beschreiben zu können. Durch die Beschreibung sollen außerdem Potentiale für eine zu entwickelnde Unterstützung aufgedeckt und konkretisiert werden.

- 3) In der *Prescriptive Study* (Präskriptive Studie) wird anschließend eine Unterstützung entwickelt. Die Unterstützung adressiert dabei die zuvor aufgedeckten Potentiale durch eine Reduktion ungünstiger Faktoren oder eine Verstärkung günstiger Faktoren.
- 4) In der *Descriptive Study II* (zweite deskriptive Studie) wird die entwickelte Unterstützung in Bezug darauf analysiert, ob sie die Situation im ausgewählten Teil der Konstruktion tatsächlich verbessern kann. Dadurch wird sie in Bezug auf ihre Auswirkungen evaluiert.

Die *Descriptive Study II* bildet die Phase innerhalb der *DRM*, die sich mit der Validierung von Unterstützung und damit von Konstruktionsmethoden befasst. Die in der Validierung zu untersuchenden Faktoren werden in der *DRM* durch *Reference* und *Impact Models* dargestellt und bilden auf diese Weise den Ausgangspunkt für die Validierung von Konstruktionsmethoden. Im Folgenden werden die *Reference* und *Impact Models* sowie die *Descriptive Study II* deshalb detaillierter vorgestellt, um die Vorgehensweise zur Validierung innerhalb *DRM* genauer darzulegen.

2.3.1.1 Reference und Impact Models – Einflüsse sichtbar machen

Ein zentrales Element innerhalb von *DRM* sind die sogenannten *Netzwerke von Einflussfaktoren*. Ziel dieser Netzwerke ist es, darzustellen, welche Faktoren einen Einfluss auf die im Fokus des Forschungsvorhabens stehenden Teil der Konstruktionspraxis haben. Dabei wird zwischen dem *Reference Model*, das die Ausgangssituation abbildet und dem *Impact Model*, das die verbesserte Situation abbildet, unterschieden. Die verbesserte Situation entsteht dabei durch die Einflüsse aus der Anwendung der zu entwickelnden Unterstützung. Durch den Vergleich von *Reference* und *Impact Model* kann also der erwartete Einfluss der Unterstützung sichtbar gemacht werden.

Zum besseren Verständnis der Modelle ist in Abbildung 2.3 ein *Reference* und ein *Impact Model* für dasselbe Forschungsvorhaben dargestellt. Ziel eines Forschungsvorhabens ist die positive Beeinflussung von *Erfolgsfaktoren*. In beiden Modellen werden deshalb Faktoren abgebildet, die einen Einfluss auf diese *Erfolgsfaktoren* ausüben. Diese Faktoren werden durch Einflüsse – visualisiert durch Pfeile – miteinander verknüpft. Jeder Einfluss wird charakterisiert durch eine Richtung (‘+’ = größer, ‘-’ = kleiner, ‘0’ = kein Einfluss) und einen Beleg ([Zahl] = Referenz zur Literatur, [A] = Annahme, [E] = Erfahrung). Im *Impact Model* ist zusätzlich die Unterstützung als Sechseck und ihr Einfluss dargestellt. Durch den Einfluss der Unterstützung ergibt sich durch die Verkettung der verschiedenen Faktoren eine neue

Situation, die zunächst vorwiegend auf Annahmen beruht. Faktoren, die direkt durch eine Unterstützung beeinflusst werden können und einen möglichst großen Einfluss auf die *Erfolgsfaktoren* haben, werden als *Schlüsselfaktoren* bezeichnet. Der Einfluss einer Unterstützung wird im *Impact Model* dargestellt.

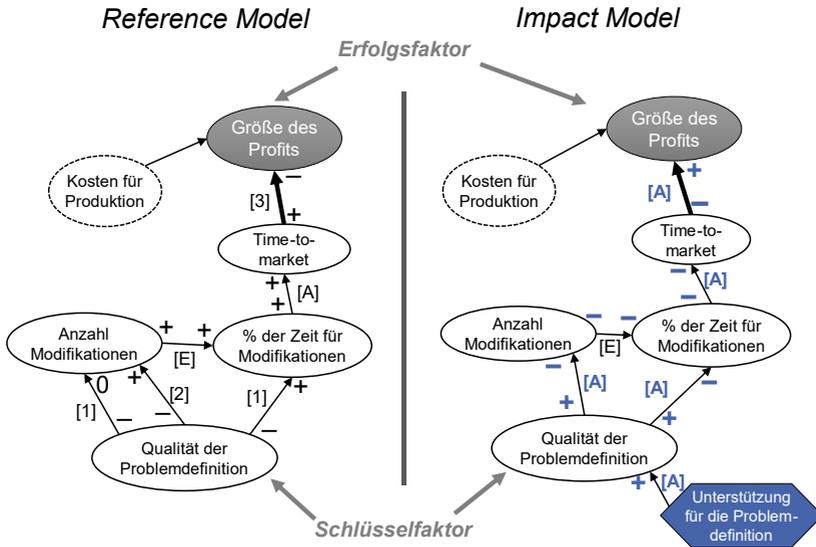


Abbildung 2.3: *Reference* und *Impact Model* eines Forschungsvorhabens zu einer Unterstützung für die Problemdefinition in der Konstruktion. Die Faktoren sind als ovale Formen dargestellt. Hervorgehoben ist der Schlüsselfaktor als Anknüpfungspunkt für eine Veränderung der Situation und der Erfolgsfaktor, auf den eine indirekte Wirkung erzielt werden soll. Veränderungen in der Situation durch die Unterstützung – dargestellt als Sechseck – sind in blau hervorgehoben. Im gezeigten Beispiel soll die *Qualität der Problemdefinition* positiv beeinflusst werden. Daraus ergibt sich eine zu prüfende Folgerung für die nachfolgenden Einflüsse auf den *Profit*. Faktoren außerhalb des Betrachtungsbereichs der Validierung werden mit gestrichelter Umrandung dargestellt. Einflüsse der Faktoren aufeinander sind in Form von Pfeilen dargestellt, deren Dicke die Stärke des Einflusses repräsentiert. Das *Reference Model* ist in Anlehnung an Blessing und Chakrabarti (2009, S. 21) und das *Impact Model* in Anlehnung an Blessing und Chakrabarti (2009, S. 25) entstanden.

Eine initiale Version des *Reference Model* wird in der *Research Clarification* erstellt, durch die erste deskriptive Studie erweitert und wo möglich mit Belegen aus der Literatur oder eigenen Forschungsergebnissen für die einzelnen Einflüsse versehen. Es bildet die Grundlage für die Entwicklung der Unterstützung in der präskriptiven Studie. Die Unterstützung soll einen oder mehrere Schlüsselfaktoren unmittelbar beeinflussen. Über die Verkettung der Einflussfaktoren im *Impact Model* entsteht dann eine indirekte Auswirkung auf mindestens einen *Erfolgsfaktor*. Auf diese Weise stellen *Impact Models* eine Visualisierung der erwarteten Einflüsse einer Konstruktionsunterstützung dar. Sie machen transparent, wo Annahmen getroffen wurden und welche Erkenntnisse zu Einflüssen aus dem Stand der Forschung stammen. Durch die Verkettung einzelner Faktoren können *Impact Models* dazu beitragen, die Auswirkungen von Konstruktionsmethoden sichtbar zu machen. Forschungsvorhaben, die sich mit mindestens einem Teil derselben Faktoren befassen, werden dadurch miteinander vergleichbar und sich widersprechende Erkenntnisse sichtbar (vgl. Quellen [1] und [2] in Abbildung 2.3).

2.3.1.2 Zweite deskriptive Studie – Evaluation der Unterstützung

Die zweite deskriptive Studie befasst sich mit der empirischen Evaluation der entwickelten Unterstützung. Als Grundlage für die Durchführung der Evaluation wird das in der präskriptiven Studie erstellte *Impact Model* verwendet. Die Evaluation gliedert sich dabei in die drei Schritte *Support Evaluation*, *Application Evaluation* und *Success Evaluation*, wobei die *Support Evaluation* bereits in der präskriptiven Studie stattfindet.

Unterstützungsevaluation (*Support Evaluation*)

Hierbei handelt es sich um eine Prüfung der Struktur der entwickelten Unterstützung, die auf einer theoretischen Ebene ohne eine empirische Untersuchung stattfindet. Die Unterstützung wird auf Vollständigkeit und logische Konsistenz in der Zusammenstellung der einzelnen Bestandteile geprüft. Der Fokus liegt hier also auf der Unterstützung selbst. Die Unterstützungsevaluation soll bereits in der präskriptiven Studie durchgeführt werden, wird aber in der zweiten deskriptiven Studie wieder aufgegriffen.

Anwendungsevaluation (*Application Evaluation*)

Dieser Schritt befasst sich mit der Untersuchung der Anwendbarkeit der Unterstützung. Deshalb muss erfasst werden, ob Nutzer die Unterstützung verstehen und sie auch anwenden können. In Bezug auf die Wirkungen der Unterstützung soll empirisch untersucht werden, ob die Unterstützung den (oder die) Schlüsselfaktor(en) wie gewünscht beeinflusst. Im Beispiel in Abbildung 2.3 bedeutet das, dass geprüft werden muss, ob die Unterstützung tatsächlich die Qualität der Problemdefinition

erhöht. Dazu muss vor der Untersuchung die Qualität der Problemdefinition durch eine Operationalisierung messbar gemacht werden.

Erfolgsevaluation (*Success Evaluation*)

Das Ziel der Erfolgsevaluation ist es, zu untersuchen, ob die Auswirkungen der Unterstützung tatsächlich einen oder mehrere Erfolgsfaktoren positiv beeinflussen. Nachdem eine direkte Wirkung der Unterstützung auf mindestens einen Schlüsselfaktor in der Anwendungsevaluation bestätigt wurde, muss in der Erfolgsevaluation also die Verkettung der Einflüsse vom Schlüsselfaktor bis zum Erfolgsfaktor untersucht werden. Auf diese Weise wird untersucht, ob die Unterstützung einen Nutzen für die Konstruktion erzeugen kann. Im Beispiel in Abbildung 2.3 bedeutet das, dass untersucht werden muss, ob die Unterstützung tatsächlich zu einer Verringerung der Anzahl von Modifikationen führt, der Anteil der Zeit für Modifikationen reduziert und damit die Zeit bis zur Markteinführung (Time-to-market) verkürzt wird, was sich letztendlich auf den Profit auswirkt.

Durch die drei beschriebenen Schritte zur Validierung definiert die *DRM* ein einheitliches Forschungsdesign für die Evaluation von Unterstützung als Abfolge mehrerer Studien, das auch für Konstruktionsmethoden Anwendung finden kann. Die *DRM* beschreibt die Vorgehensweise, zuerst die Konstruktionsmethode an sich zu prüfen, um dann sukzessive den Kontext der Untersuchung in den beiden nachfolgenden Schritten zu erhöhen. Dadurch wird die Anzahl möglicher Störeinflüsse schrittweise erhöht und alle ungeprüften Einflüsse nacheinander geprüft. Als ergänzende Erläuterungen im Allgemeinen – also für Methode, Werkzeug, Prozess und weitere – Forschungsmethoden beschrieben, die potentiell zur Validierung eingesetzt werden können. Dabei wird auf einschlägige Literatur aus den Sozialwissenschaften verwiesen und eine Auswahl von mehr als 20 Datenerhebungsmethoden sowie verschiedene Methoden zur Datenanalyse beschrieben. Die Beschreibung zu Forschungsmethoden in der *DRM* soll als Überblick dienen. Für die Durchführung eigener Studien empfehlen die Autoren, direkt die Primärliteratur aus den Sozialwissenschaften zu nutzen. Daher ist keine Beschreibung enthalten wie eine einzelne Studie zur Validierung von Konstruktionsunterstützung aufgebaut werden soll. Durch die Beschreibung in der *DRM* ergeben sich Anregungen für die Konzeption sehr vieler unterschiedlicher Validierungsstudien abhängig von der zu validierenden Unterstützung.

2.3.1.3 Zusammenfassung

Zusammengefasst beinhaltet die *DRM* mit dem *Impact Model* und einer Definition von drei Schritten zur Evaluation von Unterstützung Elemente für eine Erhöhung der

Vergleichbarkeit der Validierung von Konstruktionsmethoden auf der Ebene des Forschungsdesigns. Dadurch dass es sich um ein die gesamte Konstruktionsforschung umfassendes Lehrwerk handelt, werden viele mögliche Wege aufgezeigt, wie unterschiedliche Formen von Unterstützung untersucht werden können. Konstruktionsunterstützungen innerhalb der *DRM* weisen eine individuelle Zielsetzung auf, die durch *Research Clarification*, *Descriptive Study I* und *Prescriptive Study* herausgearbeitet und in *Impact Models* abgebildet wird. Daher soll jede Konstruktionsunterstützung in Bezug auf ihre individuelle, einzigartige Zielsetzung in der *Descriptive Study II* untersucht werden. Im Hinblick darauf, dass Erhebungs- und Analysemethoden passend zur inhaltlichen Zielsetzung ausgewählt werden sollen (vgl. Kapitel 2.1) scheint es sinnvoll, dass die *DRM* keine einheitlichen Forschungsmethoden für die Validierung vorgibt. Daraus ergibt sich auf der Ebene einzelner Validierungsstudien eine geringe Vergleichbarkeit in Bezug auf die Vorgehensweise. Für eine inhaltliche Vergleichbarkeit auf Ebene einzelner Validierungsstudien fehlt in der *DRM* zudem durch die Individualisierung eine Fokussierung auf einheitliche Ziele für Konstruktionsmethoden.

2.3.2 iDSDM – integrated Design Support Development Model

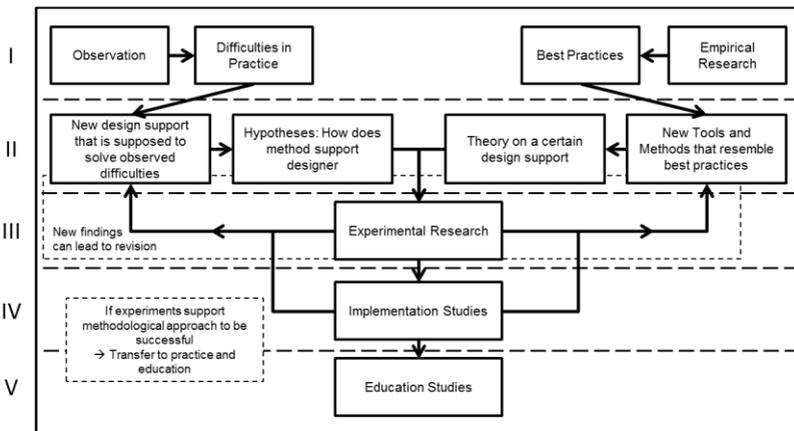
Mit dem *integrated Design Support Development Model (iDSDM)* beschreibt Marxen (2014) einen Ansatz zur Entwicklung und Validierung von Konstruktionsunterstützung. Die Beschreibungen zum *iDSDM* in diesem Kapitel basieren auf Marxen (2014). Zum *iDSDM* gehört eine Zusammenstellung von Forschungsmethoden aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, ein Prozess der Entwicklung und Validierung von Konstruktionsunterstützung und eine Adaption des integrierten Produktentstehungsmodells (*iPeM*) (Albers & Braun, 2011). Durch die Adaption des *iPeM* soll eine Auswahl geeigneter Forschungsmethoden für die jeweiligen Aktivitäten der Entwicklung von Unterstützung aus der bereitgestellten Zusammenstellung ermöglicht werden.

2.3.2.1 Vorgehensweise zur Validierung von Konstruktionsmethoden

Der im *iDSDM* bereitgestellte Prozess verortet die Aktivitäten der Entwicklung und Validierung von Unterstützung für die Konstruktion in fünf Kategorien der Konstruktionsforschung (siehe Abbildung 2.4). Durch den Prozess wird eine Reihenfolge verschiedener Studien zur Validierung der entwickelten Unterstützung vorgegeben. Die Validierung der Unterstützung findet innerhalb der Kategorien III-V des Prozesses statt.

III. Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierter Umgebung

Als erster Schritt in der Validierung finden ein oder mehrere Experimente zu den Wirkungen der Unterstützung im Labor statt (siehe Kategorie III in Abbildung 2.4). Für diesen Schritt müssen geeignete Aufgabenstellungen gefunden werden, die eine Untersuchung der Wirkungen der Konstruktionsunterstützung möglich machen. Durch das Laborexperiment soll geprüft werden, ob die untersuchte Unterstützung ihre vorgesehenen Wirkungen, also bestehende Probleme beseitigen oder best-practices umsetzen, erreichen kann. Die Untersuchung einer Unterstützung im Laborexperiment ist im *iDSDM* eine notwendige Bedingung für die nachfolgenden Untersuchungen im Feld. Die Notwendigkeit zur Weiterentwicklung der Unterstützung soll in diesem Schritt identifiziert werden, um keine unausgereifte Unterstützung ins Feld zu bringen und Iterationen zu einem späteren Zeitpunkt zu vermeiden.



Legende: Kategorien der Konstruktionsforschung

- I. Empirische Erforschung von realen Konstruktionsprozessen
- II. Entwicklung neuer Werkzeuge oder Methoden zur Unterstützung der Konstruktion
- III. Experimentelle Untersuchungen von Konstruktionsprozessen in kontrollierter Umgebung
- IV. Implementierungsstudien zu den neu entwickelten Werkzeugen und Methoden
- V. weiterführende Forschung zu Theorie und Bildung

Abbildung 2.4: Prozess zur Entwicklung und Validierung von Konstruktionsunterstützung als Teil des *iDSDM* unter Einbezug von fünf Kategorien der Konstruktionsforschung. Abbildung nach Marxen und Albers (2012, S. 6).

IV. Implementierungsstudien im Feld

Für eine umfassende Validierung werden Laborexperimente als nicht ausreichend eingestuft. Daher werden im nächsten Validierungsschritt Studien im Feld durchgeführt, um die Wirkungen der Unterstützung unter Realbedingungen zu untersuchen. Dazu müssen Unternehmen gefunden werden, die eine Untersuchung der Unterstützung innerhalb ihrer laufenden Konstruktionsprozesse ermöglichen. Die Implementierungsstudie stellt einen ersten Test der Konstruktionsunterstützung dar. Für diesen Schritt wird neben der Einschränkung, dass die Untersuchung im Feld stattfinden soll, kein Studiendesign spezifiziert.

V. Studien zum Transfer in Industrie und Lehre

Zeigt die Implementierungsstudie, dass die Unterstützung auch in einem realen Konstruktionsprozess eine positive Wirkung erzielen kann, werden Konzepte entwickelt, wie sie für eine breitere Anwendung vermittelt werden kann. Darunter fällt die Auswahl einer Zielgruppe und die Art der Vermittlung der Konstruktionsunterstützung. Dabei ist offen, ob die Unterstützung durch die Zielgruppe selbst erlernt werden soll – beispielsweise durch ein Lehrbuch – oder einer Vermittlung durch Vorlesungen oder Schulungen stattfindet.

Validierungsschritte als Problemlösung – Adaption des iPeM

Dem *iPeM* liegt die Denkweise zugrunde, dass jede Aktivität in der Produktentstehung einer Problemlösung entspricht. Die Problemlösung soll systematisch in Form einer Abfolge von Problemlösungsaktivitäten stattfinden. Innerhalb des *iDSDM* werden den Aktivitäten zur Validierung von Konstruktionsmethoden in den Kategorien III, IV und V jeweils Aktivitäten der Problemlösung zugeordnet, wodurch das *iPeM* auf die Entwicklung von Konstruktionsunterstützung adaptiert wird. Die Problemlösungsaktivitäten sind generische Schritte, die in jeder Studie angepasst auf die individuelle Situation durchlaufen werden. Dabei werden unter anderem verschiedene Studiendesigns auf Grundlage einer bereitgestellten Auswahl von Forschungsmethoden entworfen, um anschließend ein geeignetes Design auszuwählen. Auf diese Weise wird eine für die entwickelte Konstruktionsunterstützung individuelles Studiendesign zur Validierung entwickelt, was die Vergleichbarkeit der Vorgehensweise auf der Ebene einzelner Validierungsstudien verringert.

2.3.2.2 Diskussion des iDSDM im Vergleich zur DRM

Ähnlich zur *DRM* beschreibt das *iDSDM* einen Rahmen für die Konstruktionsforschung. Im *iDSDM* beginnt die Validierung mit Experimenten zur Wirkung der Unterstützung im Laborexperiment und anschließend wird die Umsetzbarkeit in Unternehmen in Feldstudien untersucht. Damit ist das Vorgehen ähnlich zur

Anwendungs- und Erfolgsevaluation innerhalb der *DRM*. Eine Betrachtung zur Vermittlung der entwickelten Konstruktionsunterstützung findet im *iDSDM* erst im letzten Schritt innerhalb der *Education Studies* statt. In der *DRM* wird diese Vermittlung bereits während der Entwicklung der Unterstützung konzipiert und im ersten Schritt der Validierung betrachtet. Es werden wie in der *DRM* mögliche Forschungsmethoden für die Konzeption von Validierungsstudien bereitgestellt. Das *iDSDM* zeigt dadurch viele Möglichkeiten für die Auswahl von Forschungsmethoden zur Validierung verschiedener Arten von Unterstützung auf, was eine Individualisierung von Forschungsvorhaben begünstigt und die Vergleichbarkeit der Vorgehensweise in der Validierung begrenzt. Im Vergleich zur *DRM* wird jedoch auf der Ebene einzelner Studien eine Eingrenzung zu verwendender Studiendesigns in den Schritten der Validierung beschrieben, indem für den ersten Validierungsschritt Laborexperimente und für den zweiten Schritt Feldstudien vorgegeben werden.

Für die Konzeption, Durchführung und Auswertung einer einzelnen Studie wird innerhalb des *iDSDM* – ähnlich zur *DRM* – auf die bereitgestellte Sammlung von Forschungsmethoden verwiesen, aus denen Forschende anhand eines Problemlösungsprozesses selbst eine geeignete Auswahl treffen sollen. Diese Auswahl beinhaltet keinen expliziten Abgleich mit bereits etablierten Vorgehensweisen zur Untersuchung ähnlicher Fragestellungen.

Ähnlich wie in der *DRM* ist das Vorgehen im *iDSDM* auf die Entwicklung und Untersuchung von Unterstützung mit individueller Zielsetzung ausgelegt, woraus eine geringe inhaltliche Vergleichbarkeit von Studien resultiert. Als Ausgangspunkt für die Entwicklung werden im *iDSDM* *best-practices* und Schwierigkeiten in empirischen Studien ermittelt, da diese die Grundlage für die Zielsetzung der Konstruktionsunterstützung bilden. Die Operationalisierung der Zielsetzung für eine Untersuchung der Wirkungen der Konstruktionsunterstützung in Experimenten wird jedoch nicht explizit thematisiert.

2.3.3 Validation Square

Die Beschreibungen zum *Validation Square* in diesem Kapitel basieren auf Pedersen et al. (2000). In ihrem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, der auf die Validierung von Konstruktionsmethoden fokussiert und dabei die Validität der Untersuchung selbst mit einbezieht. Als Ausgangspunkt für die Entwicklung ihres Ansatzes wird die Validierung mathematischer Modelle gewählt, wie sie in den Ingenieurwissenschaften häufig eingesetzt wird. Die Validierung von mathematischen Modellen erfolgt in der Regel quantitativ und genügt formalen Kriterien. Diese Art der Validierung ist bei Konstruktionsmethoden nicht möglich, da sie sich mit offenen Fragestel-

lungen befassen und sowohl objektive Komponenten als auch subjektive Einschätzungen der Konstruierenden beinhalten können. Das Ergebnis der Anwendung einer Konstruktionsmethode kann daher nicht als objektiv richtig oder falsch beurteilt werden. Durch eine Betrachtung verschiedener Ansätze aus der Erkenntnistheorie wird gefolgert, dass die Validierung dazu dient, Vertrauen in den Nutzen der Konstruktionsmethode in Bezug auf einen Zweck aufzubauen. Die Validierung sollte außerdem sowohl qualitativ als auch quantitativ erfolgen, um die objektiven und subjektiven Anteile von Konstruktionsmethoden gleichermaßen zu adressieren.

2.3.3.1 Vorgehensweise zur Validierung von Konstruktionsmethoden

Für die Validierung von Konstruktionsmethoden werden im *Validation Square* (siehe Abbildung 2.5) qualitative und quantitative Aktivitäten beschrieben.

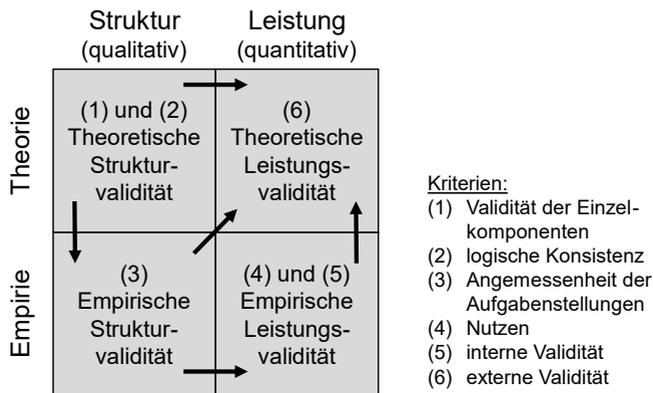


Abbildung 2.5: Der *Validation Square* bestehend aus vier Forschungsaktivitäten unter Beachtung von sechs Kriterien. Die Pfeile visualisieren, dass die Kriterien (1) - (5) als notwendige Bedingungen für eine Betrachtung der externen Validität (Kriterium (6)) zu sehen sind. Die grau hinterlegte Darstellung basiert auf Pedersen et al. (2000, S. 6) die Beschriftungen wurden ergänzt.

Die *Validierung der Struktur* erfolgt qualitativ und untersucht, ob die Konstruktionsmethode dabei hilft, auf die richtige Art und Weise zu Konstruieren. Die *Validierung der Leistung* erfolgt quantitativ und untersucht, ob die Konstruktionsmethode dabei

hilft, bessere Konstruktionsergebnisse zu erzielen. Dabei soll die resultierende Konstruktion funktionstüchtig sein und mit weniger Aufwand entstehen als ohne die Konstruktionsmethode. Sowohl die qualitative *Validierung der Struktur* als auch die quantitative *Validierung der Leistung* beinhalten theoretische und empirische Anteile. Auf diese Weise entstehen vier durchzuführende Aktivitäten, die als Matrix angeordnet den *Validation Square* ergeben. Innerhalb der vier Aktivitäten sollen sechs Kriterien in Bezug auf die Konstruktionsmethode geprüft werden. Die Aktivitäten und zu erfüllenden Kriterien werden im Folgenden vorgestellt.

Theoretische Strukturvalidität

Innerhalb dieser Aktivität werden die folgenden Kriterien durch eine theoretische Betrachtung der Konstruktionsmethode geprüft:

- (1) Validität der Einzelkomponenten
- (2) Konsistenz des Methodenaufbaus

Um Kriterium 1: *Validität der Einzelkomponenten* zu prüfen, sollen die Bestandteile, aus denen die Konstruktionsmethode aufgebaut ist, durch ein Literaturreview darauf geprüft werden, wie anerkannt sie sind. Dabei soll Wert auf etablierte, bereits lange Zeit verwendete und häufig zitierte Einzelkomponenten gelegt werden. Einzelkomponenten können Werkzeuge, Hilfsmittel oder einzelne Schritte sein, die in der Konstruktionsmethode genutzt werden.

Im Rahmen von Kriterium 2: *Konsistenz des Methodenaufbaus* schlägt der *Validation Square* vor, die Informationsflüsse innerhalb der Konstruktionsmethode durch Flussdiagramme zu visualisieren. Auf diese Weise soll geprüft werden, ob die Einzelkomponenten so miteinander kombiniert wurden, dass der Informationsoutput einer Komponente einen passenden Input für nachfolgende Komponenten darstellt.

Empirische Strukturvalidität

In dieser Aktivität soll untersucht werden, ob die empirische Untersuchung der Konstruktionsmethode in der nachfolgenden *empirischen Leistungsvalidität* vergleichbar zu dem durch die Konstruktionsmethode angestrebten Kontext sein kann. Für die Abbildung des Kontexts werden in empirischen Studien Aufgabenstellungen genutzt. Daher wird in dieser Aktivität Kriterium 3: *Angemessenheit der Aufgabenstellungen* geprüft, indem verschiedene Aspekte der Aufgabenstellungen qualitativ hinterfragt werden. Zuerst soll diskutiert werden, ob die Aufgabenstellungen ähnlich zu den Fällen sind, für die die Einzelkomponenten als akzeptiert gelten. Außerdem sollen die Aufgabenstellungen eine Situation abbilden, die exemplarisch für den durch die Zielsetzung der Konstruktionsmethode adressierten Kontext steht. Zusätzlich

soll diskutiert werden, ob durch die Bearbeitung der Aufgabenstellungen Daten entstehen können, die einen Rückschluss auf den Nutzen der Konstruktionsmethode zulassen.

Empirische Leistungsvalidität

In dieser Aktivität wird die einzige tatsächlich empirische Untersuchung innerhalb des *Validation Square* durchgeführt, um die folgenden Kriterien zu prüfen:

- (4) Wirkungen der Methode tragen zum *Nutzen* bei
- (5) Methodenanwendung ist die Ursache der Wirkungen (= interne Validität)

Kriterium (4) bezieht sich dabei darauf, ob in Bezug auf die gestellten Aufgabenstellungen ein Nutzen der Konstruktionsmethode begründet werden kann. Für die Erfassung muss der Nutzen in beobachtbare Variablen operationalisiert werden (vgl. Kapitel 2.1.2). In Kriterium (5) wird die interne Validität der Untersuchung geprüft, indem die innerhalb der empirischen Studie erarbeiteten Lösungen mit und ohne die Verwendung einzelner Komponenten der Konstruktionsmethode miteinander verglichen werden. Es wird innerhalb des *Validation Square* jedoch nicht beschrieben, wie die zur Prüfung der Kriterien (4) und (5) notwendige empirische Studie aufgebaut werden soll.

Theoretische Leistungsvalidität

In dieser Aktivität soll die Übertragbarkeit auf reale Kontexte geprüft werden, was einer Prüfung der *externen Validität* (Kriterium (6)) entspricht. Die Argumentation im *Validation Square* ist, dass eine Übertragbarkeit auf reale Kontexte gefolgert werden kann, wenn die Kriterien (1) – (5) zuvor erfüllt werden konnten. Allerdings besteht für die *externe Validität* trotzdem die Einschränkung, dass die induktive Folgerung aus den anderen Kriterien auf wenigen Einzelfällen beruht und daher die Glaubwürdigkeit von der Argumentation abhängig ist.

2.3.3.2 Diskussion des Validation Square im Vergleich zur DRM

Die Prüfung der *theoretischen Strukturvalidität* ist dabei vergleichbar zur Anwendungsevaluation innerhalb der *DRM*. Zusätzlich zu einer Prüfung der logischen Konsistenz (Kriterium (2)) sieht der *Validation Square* durch Kriterium (1) eine Prüfung der einzelnen Komponenten der Konstruktionsmethode vor. Damit soll sichergestellt werden, dass auf etablierte Ansätze zurückgegriffen wird, da jede Komponente der Konstruktionsmethode aus dem Stand der Forschung begründet werden soll. Die konsequente Umsetzung dieses Kriteriums erhöht direkt die Vergleichbarkeit neu entstehender Konstruktionsmethoden zu bereits etablierten Konstruktionsmethoden und Vorgehensweisen.

Mit der Prüfung der *empirischen Strukturvalidität* führt der *Validation Square* ein Kriterium ein, das in den bisher vorgestellten Ansätzen nicht explizit beschrieben wird. Innerhalb von Kriterium (3) muss begründet werden, warum die Aufgabenstellungen, die zur Untersuchung der Konstruktionsmethode verwendet werden, reale Anwendungsfälle abbilden und für eine Erhebung des Nutzens geeignet sind. Auf diese Weise wird die Untersuchung selbst im Hinblick auf die Praxisrelevanz geprüft. Damit trägt das Kriterium zu einer Sicherung der Studienqualität bei.

Die Prüfung der *empirischen Leistungsvalidität* entspricht im Wesentlichen der *Anwendungsevaluation* innerhalb der *DRM*. Zusätzlich zur Prüfung des Nutzens in Kriterium (4) wird durch Kriterium (5) eine Prüfung der internen Validität der Untersuchung beschrieben. Die interne Validität wird geprüft, indem sichergestellt wird, dass die Anwendung der Konstruktionsmethode tatsächlich die Ursache der auftretenden Wirkungen ist. Dazu muss die empirische Untersuchung in einem kontrollierten Umfeld stattfinden, in dem anderen Einflüsse weitgehend ausgeschlossen werden können. Außerdem muss geprüft werden, ob die Konstruktionsmethode auch tatsächlich in der Bearbeitung der ausgewählten Aufgabenstellungen angewendet wird.

Im Unterschied zur *DRM* sieht der *Validation Square* keine empirische Studie für die *Erfolgsevaluation* vor. Die Illustration der externen Validität (Kriterium (6)) der Untersuchungsergebnisse zum Nutzen der Konstruktionsmethode geschieht durch Argumentation auf Grundlage der erfüllten Kriterien (1) – (5).

Der *Validation Square* fokussiert die empirische Untersuchung auf eine quantitative Untersuchung der Wirkungen von Konstruktionsmethoden in einer kontrollierten Umgebung, also in einem Laborkontext. Dabei wird die Qualität der Untersuchung durch die Definition von Kriterien gewährleistet und Gütekriterien wie interne und externe Validität der durchzuführenden Studien explizit mit einbezogen. Weitere Kriterien innerhalb des Ansatzes tragen zudem dazu bei, dass ein Vergleich der zu untersuchenden Konstruktionsmethode mit bestehenden Ansätzen (Kriterium (1): Validität der Einzelkomponenten) und eine intensive Auseinandersetzung mit der Abbildung des adressierten Kontexts (Kriterium (3): Aufgabenstellungen) stattfindet. Die Erfüllung der Kriterien des *Validation Square* kann also maßgeblich dazu beitragen, die Qualität und inhaltliche Vergleichbarkeit von Validierungsstudien zu erhöhen. Allerdings wird der Nutzen allgemein durch den „Grad der Erfüllung eines Zwecks“ definiert und eine Vorgehensweise zu dessen Operationalisierung in beobachtbare Variablen nicht explizit beschrieben.

Durch *Kriterium (5) interne Validität* und die Forderung nach einer quantitativen empirischen Untersuchung wird die Wahl eines Studiendesigns eingeschränkt (vgl. Kapitel 2.1.1). Dadurch wird die Validierung in Bezug auf das Studiendesign besser

vergleichbar. Im *Validation Square* wird allerdings nicht darauf eingegangen, wie eine quantitative empirische Studie zur Validierung der Konstruktionsmethode aufgebaut werden kann.

2.3.4 Nutzung von Forschungsmethoden aus anderen Disziplinen

Die Nutzung von Forschungsmethoden aus anderen Fachdisziplinen kann als ein übergreifender Ansatz in der Konstruktionsforschung gesehen werden, der auch für die Validierung von Konstruktionsmethoden eingesetzt werden kann. Die folgende Übersicht soll zeigen, wie vielfältig die Möglichkeiten sind, Forschungsmethoden aus anderen Fachdisziplinen auf die Validierung von Konstruktionsmethoden zu übertragen.

In der *DRM* (Kapitel 2.3.1) werden Ansätze aus verschiedenen Fachdisziplinen für die Evaluation in der zweiten deskriptiven Studie beschrieben und auf die Fachliteratur dieser Disziplinen verwiesen. Das *iDSDM* (Kapitel 2.3.2) beinhaltet eine Sammlung von Forschungsmethoden aus verschiedenen Fachdisziplinen (unter anderem der Erkenntnistheorie, der Psychologie und der empirischen Sozialwissenschaften).

Das *eight fold model of design research* (Eckert et al., 2003) wird die Validierung von Konstruktionsmethoden durch die *Evaluation von Werkzeugen und Vorgehensweisen* abgebildet. Dort wird eine Analogie zur Softwareentwicklung hergestellt, wo die Anwendbarkeit und Verständlichkeit der Werkzeuge und Vorgehensweisen eine wichtige Rolle spielt. In der Softwareentwicklung werden daher vorwiegend iterative Verfahren und Prototypen für die Evaluation und Weiterentwicklung eingesetzt. Die Autoren empfehlen daher, Ansätze aus der Mensch-Computer-Interaktion für die Evaluation von Werkzeugen und Vorgehensweisen in der Konstruktionsforschung zu verwenden.

Frey und Dym (2006) beschreiben in ihrer *Design Method – Medical Treatment Analogy* einen Vergleich der Validierung von Konstruktionsmethoden mit der Forschung in der evidenzbasierten Medizin. Sie schlagen vor, evidenzbasierte Validierungsverfahren anzuwenden, wie sie in der Forschung zu medizinischen Behandlungen etabliert sind.

Bernd Bender et al. (2002) befassen sich mit der Anwendung von Forschungsmethoden aus den Sozialwissenschaften in der Konstruktionsforschung. Sie identifizieren verschiedene Methoden aus den Sozialwissenschaften, die geeignet für die Konstruktionsforschung sind. Dabei werden die *Inhaltsanalyse* – als Methode zur

Untersuchung der Arbeitsergebnisse – sowie die *Beobachtung*, die *Befragung* und das *Experiment* als Methoden zur Untersuchung des menschlichen Verhaltens als geeignet eingestuft.

2.3.4.1 Diskussion zur Nutzung von Forschungsmethoden aus anderen Disziplinen

Das Zurückgreifen auf etablierte Forschungsmethoden aus anderen Disziplinen ermöglicht es, eine Vergleichbarkeit zu diesen Disziplinen herzustellen. Zusätzlich sind diese Forschungsmethoden vielfach erprobt und können eine hohe Validität der erzielbaren Forschungsergebnisse begünstigen. Allerdings ist bei der Übernahme von Forschungsmethoden aus anderen Disziplinen zu prüfen, welche Annahmen deren Anwendung zugrunde liegen und ob diese Annahmen auch auf das eigene Forschungsvorhaben zutreffen (vgl. Bernd Bender et al., 2002). Durch die große Vielfalt möglicher Forschungsmethoden aus verschiedenen Fachdisziplinen wird zunächst eine Individualisierung in der Vorgehensweise zur Validierung bewirkt und dadurch die Vergleichbarkeit von Studien reduziert. Etablierten Forschungsmethoden aus anderen Fachdisziplinen liegt jedoch häufig auch eine etablierte und valide Operationalisierung zugrunde, die die Forschungsmethoden mit den zu untersuchenden latenten Konstrukten verknüpft. Können latente Konstrukte aus anderen Fachdisziplinen auf die Konstruktionsforschung übertragen werden, können die etablierten Forschungsmethoden übernommen und damit gleichzeitig die Vergleichbarkeit von Studien im Hinblick auf Vorgehensweise und Untersuchungsinhalte von Studien erhöht werden.

2.3.5 Zwischenfazit

Zusammenfassend haben die vorgestellten Ansätze *DRM*, *iDSDM* und *Validation Square* gemeinsam, dass sie mehrere Schritte beschreiben, die für eine umfassende Validierung von Konstruktionsmethoden notwendig sind. Die Ansätze sind in Tabelle 2.3 gegenübergestellt und werden im Folgenden im Hinblick auf die Vorgehensweise zur Validierung miteinander verglichen.

Der Vergleich zeigt, dass die *DRM* und der *Validation Square* mit einer theoretischen Betrachtung und Bewertung der Konstruktionsmethode im Hinblick auf deren Konsistenz, potentiellen Nutzen im Hinblick auf das Ziel der Konstruktionsmethode und ihre Anwendbarkeit beginnen. Im *iDSDM* soll die Konsistenz der Konstruktionsmethode bereits in ihrer Entwicklung sichergestellt werden, die Anwendbarkeit wird allerdings erst im letzten Schritt in den *Education Studies* untersucht. Alle vorgestellten Ansätze schließen eine empirische Validierung ein, die die Anwendung der Methode und die Untersuchung ihrer Auswirkungen in einem kontrollierten Kontext

umfasst. Im *Validation Square* wird für diese Untersuchung zusätzlich geprüft, ob die zur Validierung eingesetzten Aufgabenstellungen den durch die Konstruktionsmethode adressierten Kontext und ihren Wirkungsbereich (vgl. Kapitel 2.2.2) adäquat abbilden. Ebenfalls wird in allen drei vorgestellten Ansätzen der Nutzen der Konstruktionsmethode in einem realen Kontext im Unternehmen adressiert. In der *DRM* und im *iSDM* wird dieser Nutzen durch empirische Studien untersucht, wohingegen der *Validation Square* eine induktive und damit theoretische Vorgehensweise beschreibt.

Tabelle 2.3: Vergleich der Validierungsschritte innerhalb der verschiedenen Ansätze zur Validierung von Konstruktionsmethoden und Konsolidierung in drei Schritte für die vorliegende Arbeit.

Ansatz	Validierungsschritte				
<i>DRM</i> (Blessing & Chakrabarti, 2009)	<i>Support Evaluation</i>	<i>Application Evaluation</i>		<i>Success Evaluation</i>	–
<i>iSDM</i> (Marxen, 2014)	(in der Entwicklung betrachtet)	<i>Experimental Research</i>		<i>Implementation Studies</i>	Education Studies
<i>Validation Square</i> (Pedersen et al., 2000)	Theoretische Strukturvalidität	Empirische Strukturvalidität Leistungsvalidität		Theoretische Leistungsvalidität	
Konsolidierung	Struktur (theoretisch)	Wirkung (empirisch)		Leistung (empirisch)	

Von mehreren Autoren wird außerdem die Anwendung von etablierten Forschungsmethoden aus anderen Disziplinen zur Validierung von Konstruktionsmethoden empfohlen. Die Anwendung dieser Forschungsmethoden soll jedoch erst nach gründlicher Prüfung der Eignung für die Konstruktionsforschung erfolgen. Durch eine Betrachtung der in anderen Fachdisziplinen etablierten Operationalisierung kann zusätzlich eine inhaltliche Vergleichbarkeit im Hinblick auf die untersuchten latenten Konstrukte begünstigt werden.

In Bezug auf die Zielstellung dieser Arbeit, die Durchführung möglichst vergleichbarer Validierungsstudien von Konstruktionsmethoden in Form eines Referenzprozesses zu beschreiben, sind die vorgestellten Ansätze nur teilweise geeignet. Innerhalb der Ansätze wird auf der Ebene des Forschungsdesigns in der Validierung durchzuführende Schritte definiert und in einzelnen Ansätzen Empfehlungen für das grundlegende Studiendesign oder die zu verwendende Klasse an Konstruktionsmethoden (vgl. Kapitel 2.1.1) innerhalb dieser Schritte gegeben. Allerdings wird in keinem der Ansätze ein explizites Vorgehen zum Aufbau einzelner Studien für definierte Zielsetzungen innerhalb der Methodenvvalidierung gegeben. Dies begünstigt die individuelle Nutzung von Erhebungs- und Analysemethoden in der Untersuchung vergleichbarer Zielstellungen, woraus eine geringe Vergleichbarkeit der Vorgehensweise entstehen kann.

Die *DRM* bezieht über die Bildung von *Impact Models* ein mögliches Werkzeug zur Operationalisierung der zu untersuchenden latenten Konstrukte mit ein. In allen betrachteten Ansätzen steht jedoch die Individualisierung von Zielsetzungen für die jeweilige Konstruktionsmethode im Vordergrund, wodurch individuelle latente Konstrukte definiert werden und die inhaltliche Vergleichbarkeit eingeschränkt wird. Auf die Operationalisierung der weiteren Erfolgskriterien *Anwendbarkeit* und *Akzeptanz* (vgl. Kapitel 2.4) wird zudem nicht explizit eingegangen.

Für eine Einschätzung zum Grad der Umsetzung der durch die Ansätze vorgeschlagenen Vorgehensweisen fehlt zudem im Stand der Forschung bisher ein Überblick zur aktuellen Forschungspraxis in der Validierung von Konstruktionsmethoden.

2.4 Erfolgskriterien für die Validierung von Konstruktionsmethoden

In der Beschreibung zu bestehenden Ansätzen für die Validierung von Konstruktionsmethoden (Kapitel 2.3) wurde auf das Vorgehen zur Validierung und die zugehörigen Forschungsmethoden eingegangen. Zusätzlich zum Vorgehen sollen Kriterien betrachtet werden, die für eine erfolgreiche Validierung einer Konstruktionsmethode zu prüfen sind. Da Konstruktionsmethoden individuelle Ziele verfolgen (vgl. Kapitel 2.2), können nicht alle möglichen Erfolgskriterien auf Ebene der beobachtbaren Variablen betrachtet werden. Daher werden in diesem Kapitel die übergeordneten Erfolgskriterien *Anwendbarkeit*, *Nutzen* und *Akzeptanz* betrachtet, die bereits in verschiedenen Ansätzen und Studien zum Einsatz kommen. Bei diesen übergeordneten Erfolgskriterien handelt es sich um latente Konstrukte (vgl. Kapitel 2.1.2), die für die Anwendung in einer Studie zunächst operationalisiert wer-

den müssen. Die Erfolgskriterien werden im Folgenden jeweils zuerst definiert, anschließend ihre Rolle in der Validierung von Konstruktionsmethoden beschrieben und abschließend vorgestellt, wie diese Kriterien bisher untersucht werden. In einem Fazit werden die Zusammenhänge zwischen den Erfolgskriterien dargestellt und der aktuelle Stand der Vergleichbarkeit von Studien durch die Anwendung der Kriterien reflektiert.

2.4.1 Anwendbarkeit

Die *Anwendbarkeit* wird bisher nur in wenigen Untersuchungen zu Konstruktionsmethoden erfasst und beschrieben, obwohl sie in bestehenden Ansätzen zur Validierung von Konstruktionsmethoden (siehe Kapitel 2.3) explizit oder implizit eine Rolle spielt.

2.4.1.1 Definition

Unter dem Begriff *Anwendbarkeit* werden alle Eigenschaften der Konstruktionsmethode zusammengefasst, die dazu beitragen, dass sie durch die Zielgruppe im anvisierten Kontext angewendet werden kann (vgl. Blessing & Chakrabarti, 2009; Kroll & Weisbrod, 2020; Motte & Eriksson, 2016). Dazu gehört auch, wie die Konstruktionsmethode vermittelt wird (vgl. Blessing & Chakrabarti, 2009; Kroll & Weisbrod, 2020).

2.4.1.2 Bedeutung für die Validierung von Konstruktionsmethoden

Die *Anwendbarkeit* wird von verschiedenen Autoren als eine relevante Variable in der Validierung von Konstruktionsmethoden gesehen (Blessing & Chakrabarti, 2009; Kroll & Weisbrod, 2020; Marxen, 2014; Motte & Eriksson, 2016). Die *Anwendbarkeit* einer Konstruktionsmethode ist als notwendige Bedingung für die Erfüllung der weiteren Erfolgskriterien *Nutzen* und *Akzeptanz* zu sehen (siehe Abbildung 2.6), da sie für eine korrekte Anwendung der Konstruktionsmethode sorgt. Damit bildet sie eine Grundbedingung für empirische Untersuchungen in der Validierung von Konstruktionsmethoden und soll zu Beginn der empirischen Validierung im Vordergrund stehen.

2.4.1.3 Untersuchung in der Validierung von Konstruktionsmethoden

In der *DRM* (Blessing & Chakrabarti, 2009) soll die *Anwendbarkeit* in der Anwendungsevaluation untersucht werden. Es wird die Durchführung von Pilotstudien empfohlen, um eine ordnungsgemäße Einführung und *Anwendbarkeit* der Konstruktionsmethode sicherzustellen. Die Beschreibung beinhaltet nicht, wie eine Pilotstu-

die zur *Anwendbarkeit* der Konstruktionsmethode gestaltet werden soll, welche Aspekte der *Anwendbarkeit* untersucht werden sollen und wie diese operationalisiert werden können. Im *iDSDM* (Marxen, 2014) wird die *Anwendbarkeit* erst im letzten Schritt der Validierung in den Transferstudien (vgl. Kapitel 2.3.2.1) adressiert, indem Schulungs- und Lehrkonzepte für die entwickelte Konstruktionsmethode erarbeitet werden.

Motte und Eriksson (2016) stellen ein Rahmenwerk für die Evaluation von Methodiken vor, das verschiedene Aspekte in Bezug auf die *Anwendbarkeit* beinhaltet. Sie definieren sechs verschiedene latente Variablen in Bezug auf *Anwendbarkeit* einer Methodik: Einfachheit der Anwendung, Eignung, Anpassungsfähigkeit, Abstraktheit, Lernbarkeit und Attraktivität. Der Beitrag zielt darauf ab, eine umfassende Checkliste mit Aspekten bereitzustellen, die bei der Entwicklung einer Methodik zu berücksichtigen sind. Diese Aspekte sind auch für Konstruktionsmethoden relevant, wie Motte et al. (2018) anhand der Anwendung auf eine Konstruktionsmethode zeigen. Es werden jedoch keine Hinweise gegeben, wie die vorgestellten latenten Variablen operationalisiert werden können.

Kroll und Weisbrod (2020) nutzen das zuvor beschriebene Rahmenwerk (Motte & Eriksson, 2016) und entwickeln die latenten Variablen weiter, um anschließend beobachtbare Variablen für die *Anwendbarkeit* zu definieren. Sie setzen diese beobachtbaren Variablen anschließend ein, um die *Anwendbarkeit* einer Konstruktionsmethode zu untersuchen. Sie beschreiben dabei *Anwendbarkeit* durch die latenten Variablen *Lehrfreundlichkeit*, *Verständlichkeit*, *Benutzerfreundlichkeit* und *Korrektheit der Anwendung*. Die beobachtbaren Variablen werden vorwiegend qualitativ durch verbale Selbsteinschätzung (*Lehrfreundlichkeit*), Fragebögen zur Einschätzung auf einer Skala (*Verständlichkeit*, *Benutzerfreundlichkeit*) und Interpretation der Dokumentation der Arbeitsergebnisse der Probanden (*Korrektheit der Anwendung*) erhoben. Eine ähnliche Operationalisierung für die *Korrektheit der Anwendung* wird von Nelius und Matthiesen (2019) verwendet, die *Anwendbarkeit* in ihrer Untersuchung dadurch erfassen, wie umfangreich die Studienteilnehmer ein Template für die Anwendung der Konstruktionsmethode ausfüllen.

Die *Lehrfreundlichkeit*, *Verständlichkeit*, *Benutzerfreundlichkeit* und *Korrektheit der Anwendung* als Anteile der *Anwendbarkeit* bilden latente Variablen, die bereits in beobachtbare Variablen operationalisiert und Forschungsmethoden zu ihrer Erhebung beschrieben wurden. Diese Variablen sind übertragbar auf verschiedene Konstruktionsmethoden und können daher eine inhaltlich vergleichbare Untersuchung der *Anwendbarkeit* ermöglichen.

2.4.2 Nutzen

Der *Nutzen* einer Konstruktionsmethode entsteht durch eine Beeinflussung des Denkens und Handelns der Konstruierenden, durch die das Ergebnis eines Schrittes oder einer Phase der Konstruktion verbessert wird. Daher ist der *Nutzen* einer Konstruktionsmethode eng mit dem *Ziel*, dem *Wirkungsbereich* und dem *Kontext* der Anwendung (vgl. Kapitel 2.2.1) verknüpft.

2.4.2.1 Definition: Wirksamkeit und Effektivität als Anteile des Nutzens

Daalhuizen und Cash (2021) differenzieren verschiedene Stufen des *Nutzens* durch *Wirksamkeit* und *Effektivität*, indem sie sich auf eine Einordnung von Gottfredson et al. (2015) stützen. Durch diese Differenzierung sind *Wirksamkeit* und *Effektivität* als Anteile des *Nutzens* zu sehen.

Wirksamkeit

Die *Wirksamkeit* beschreibt die direkten Auswirkungen aus der Anwendung der Konstruktionsmethode (Blessing & Chakrabarti, 2009; Daalhuizen & Cash, 2021; Pedersen et al., 2000). Die Auswirkungen können sich auf das Denken und Handeln der Konstruierenden (Daalhuizen & Cash, 2021) aber auch auf die unmittelbar durch die Anwendung der Konstruktionsmethode erzielten Ergebnisse in Bezug auf die Konstruktion (Blessing & Chakrabarti, 2009; Pedersen et al., 2000) beziehen.

Effektivität

Die *Effektivität* beschreibt, wie gut die durch die Konstruktionsmethode gewünschten indirekten Auswirkungen innerhalb des anvisierten Kontextes der Anwendung in der Praxis erreicht werden (Blessing & Chakrabarti, 2009; Daalhuizen & Cash, 2021; Pedersen et al., 2000).

2.4.2.2 Bedeutung für die Validierung von Konstruktionsmethoden

Der *Nutzen* bildet ab, inwieweit die Konstruktionsmethode ihr Ziel erreicht. Dadurch ist der *Nutzen* die zentrale Größe in der Validierung von Konstruktionsmethoden, weil durch seine Untersuchung die Daseinsberechtigung der Konstruktionsmethode als Konstruktionsunterstützung geprüft wird.

Die Untersuchung der *Wirksamkeit* beinhaltet die Prüfung, ob die beobachteten Auswirkungen auch tatsächlich auf die Konstruktionsmethode zurückzuführen sind (Pedersen et al., 2000). Die *Effektivität* ermöglicht eine Einschätzung dazu, ob die direkten Auswirkungen der Konstruktionsmethode auch tatsächlich indirekt einen Mehrwert für die Praxis erzeugen (Blessing & Chakrabarti, 2009). Auf diese Weise ermöglichen die *Wirksamkeit* und *Effektivität* gemeinsam eine Einschätzung zum

Nutzen der Konstruktionsmethode in der Praxis (Daalhuizen & Cash, 2021). Die *Wirksamkeit* ist als notwendige Bedingung für die *Effektivität* zu sehen. Daher soll die Validierung einer Konstruktionsmethode in Bezug auf die *Wirksamkeit* in der vollständigen Validierung einer Konstruktionsmethode vor der Validierung in Bezug auf die *Effektivität* durchgeführt werden (vgl. Blessing & Chakrabarti, 2009).

2.4.2.3 Untersuchung in der Validierung von Konstruktionsmethoden

Aufgrund der Verknüpfung des *Nutzens* einer Konstruktionsmethode mit deren Zielsetzung und dem adressierten Kontext ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten, diese zu untersuchen, die hier nicht erschöpfend vorgestellt werden können. Daher wird im Folgenden auf Empfehlungen zur Untersuchung der latenten Konstrukte *Wirksamkeit* und *Effektivität* innerhalb bestehender Ansätze eingegangen.

Wirksamkeit

In der *DRM* wird die *Wirksamkeit* in der Anwendungsevaluation untersucht (vgl. Kapitel 2.3.1.2). Dazu vergleichbar ist die Untersuchung der empirischen Leistungsvalidität im *Validation Square* (siehe Kapitel 2.3.3). Im *iDSDM* kann die Untersuchung der *Wirksamkeit* in den Experimenten zur Wirkung der Konstruktionsmethode direkt nach deren Entwicklung (vgl. Kapitel 2.3.2) verortet werden. Damit kann die Untersuchung der *Wirksamkeit* der *Validierung der Wirkung* (siehe Tabelle 2.3) zugeordnet werden. Die Ansätze empfehlen für diesen Validierungsschritt eine Untersuchung in einer kontrollierten Umgebung, die *Wirksamkeit* soll also vorwiegend in Laborstudien untersucht werden.

In der *DRM* (Blessing & Chakrabarti, 2009) wird ein übergeordnetes Vorgehen zur Operationalisierung der *Wirksamkeit* beschrieben. Die *Wirksamkeit* ist innerhalb des Ansatzes als Einfluss der Konstruktionsmethode auf ausgewählte Schlüsselfaktoren im *Impact Model* definiert. Das *Impact Model* ist in der *DRM* als Form der Dokumentation der Erkenntnisse zur übergeordneten Fragestellung zu sehen. Darin werden die Erkenntnisse aus der *Research Clarification*, *Descriptive Study I* und *Prescriptive Study* dokumentiert (vgl. Kapitel 2.3.1). Die Operationalisierung findet in *DRM* also begleitend zur Entwicklung und individuell in Bezug auf das Ziel der Konstruktionsmethode statt. Sind die Schlüsselfaktoren bereits selbst beobachtbare Variablen, müssen diese für eine Untersuchung nicht weiter operationalisiert werden.

Effektivität

In der *DRM* wird *Effektivität* als Auswirkungen der Unterstützung auf die *Erfolgsfaktoren* in der Erfolgsevaluation (vgl. Kapitel 2.3.1.2) und im *iDSDM* in den Implementierungsstudien (vgl. Kapitel 2.3.2.1) untersucht. Die Untersuchung der *Effektivität* soll in einem realen oder möglichst realitätsnahen Kontext – also vorwiegend in

Feldstudien – stattfinden (Blessing & Chakrabarti, 2009; Daalhuizen & Cash, 2021; Marxen, 2014).

Im *Validation Square* erfolgt keine gesonderte Untersuchung der *Effektivität*, sondern es wird induktiv in der Untersuchung der theoretischen Leistungsvalidität direkt auf den *Nutzen* der Konstruktionsmethode in der Praxis geschlossen (vgl. Kapitel 2.3.3.1). Die Argumentation beruht in diesem Ansatz auf einer passenden Auswahl der zur empirischen Validierung eingesetzten Aufgabenstellungen. Bilden diese die Problemstellungen aus der Praxis adäquat ab, kann eine positive Prüfung der *Wirksamkeit* auf einen realen Kontext generalisiert werden.

Die Operationalisierung der *Effektivität* erfolgt in der *DRM* (Blessing & Chakrabarti, 2009) analog zur *Wirksamkeit* über das der Untersuchung zugrundeliegende *Impact Model*. Allerdings werden nicht nur die direkten Auswirkungen der Konstruktionsmethode untersucht, sondern stattdessen die gesamte erwartete Verkettung von Einflüssen zwischen den Schlüsselfaktoren bis zu einem oder mehreren Erfolgsfaktoren (vgl. Kapitel 2.3.1.1). Können die Erfolgsfaktoren selbst nicht erfassbar gemacht werden – sind sie also latente Konstrukte oder latente Variablen ohne geeignete Operationalisierung – schlägt die *DRM* vor, stellvertretend erfassbare Erfolgsfaktoren zu definieren. Die Ersetzung von Erfolgsfaktoren durch erfassbare Erfolgsfaktoren – also in beobachtbare Variablen überführbare Faktoren – erfolgt dabei argumentativ oder auf der Basis bestehender Untersuchungen aus dem Stand der Forschung. Beispielsweise kann argumentiert werden, dass die Entwicklungszeit (erfassbar innerhalb eines Forschungsprojekts) stellvertretend für den erzielten Profit (übersteigt ggf. den Zeithorizont des Forschungsprojekts) als Erfolgsfaktor genutzt werden kann.

Der *Nutzen* ist mit der Zielsetzung der Konstruktionsmethode, dem Wirkungsbereich und dem Kontext der Anwendung verknüpft. Diese Aspekte können für die zu validierende Konstruktionsmethode individuell ausgeprägt sein. Dadurch sind auch *Wirksamkeit* und *Effektivität* potentiell individuell für die jeweilige Konstruktionsmethode und daher Studien inhaltlich in Bezug auf die Operationalisierung voraussichtlich nur wenig vergleichbar. Im Stand der Forschung existiert zudem kein Überblick über die aktuelle Praxis der Methodvalidierung, der eine Einschätzung der Vergleichbarkeit der verwendeten Operationalisierungen für den *Nutzen* einer Konstruktionsmethode ermöglicht.

2.4.3 Akzeptanz

Die *Akzeptanz* wird von verschiedenen Autoren als Einfluss auf die Anwendung von Konstruktionsmethoden in der industriellen Praxis beschrieben (Jänsch, 2007;

Wallisch et al., 2021) oder in empirischen Studien für die Zielstellung der Untersuchung genutzt (Reiß et al., 2017; Üreten et al., 2017).

2.4.3.1 Definition

Wallisch et al. (2021) argumentieren, dass bisher keine klare Definition für *Akzeptanz* in der Produktentwicklung und Konstruktion existiert und erarbeiten durch das Zusammenführen verschiedener Ansätze selbst eine Definition:

„Die Methodenakzeptanz in der Produktentwicklung beschreibt die Einstellung des designierten Anwenders zu einer bestimmten Verhaltensweise im Rahmen der Methodenanwendung, die sich in unterschiedlichen Verhaltensausrägungen auf einem Kontinuum zwischen Bereitschaft und Ablehnung manifestieren kann.“ (Wallisch et al., 2021, S. 2042–2043)

Diese Definition ist von den Autoren bewusst sehr offen gehalten, um die zahlreichen Einflüsse auf die Akzeptanz mit einzuschließen.⁴

2.4.3.2 Bedeutung für die Validierung von Konstruktionsmethoden

„Die Akzeptanz ist [...] die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Methodeneinführung und -anwendung.“ (Reiß et al., 2017, S. 436). Die *Akzeptanz* beeinflusst also maßgeblich, ob eine Konstruktionsmethode nach ihrer Einführung in der Praxis auch weiterhin angewendet wird. Die *Akzeptanz* wird durch die *Anwendbarkeit* und den *Nutzen* der Konstruktionsmethode beeinflusst, wie Jansch (2007) illustriert. Für die Validierung von Konstruktionsmethoden bildet die Untersuchung der *Akzeptanz* also die abschließende Prüfung bevor die Validierung als abgeschlossen angesehen werden kann.

2.4.3.3 Untersuchung in der Validierung von Konstruktionsmethoden

Aktuell wird die *Akzeptanz* in Studien vorwiegend durch Befragung erhoben (vgl. Reiß et al., 2017; Üreten et al., 2017). Die Operationalisierung scheint dabei übertragbar auf verschiedene Konstruktionsmethoden zu sein.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die *Akzeptanz* nicht näher betrachtet, da vor einer Untersuchung der *Akzeptanz* die *Anwendbarkeit*, *Wirksamkeit* und *Effektivität* fokussiert werden sollen. Diese Forschungsarbeit fokussiert im Weiteren auf die *Anwendbarkeit* und *Wirksamkeit*.

⁴ Eine ausführlichere Betrachtung zur *Akzeptanz* findet sich in Wallisch et al. (2021).

2.4.4 Zwischenfazit

Die Erfolgskriterien *Anwendbarkeit*, *Nutzen* – bestehend aus *Wirksamkeit* und *Effektivität* – und *Akzeptanz* finden sich in verschiedenen Ansätzen zur Validierung von Konstruktionsmethoden wieder.

2.4.4.1 Zusammenhänge zwischen den Erfolgskriterien

Die beschriebenen Erfolgskriterien beeinflussen sich untereinander (siehe Abbildung 2.6). *Anwendbarkeit* ist als notwendige Voraussetzung für den *Nutzen* einer Konstruktionsmethode zu sehen. Innerhalb des *Nutzens* bildet die *Wirksamkeit* die Grundlage für die *Effektivität*. *Anwendbarkeit* und *Nutzen* spielen zudem gemeinsam eine Rolle für die *Akzeptanz* von Konstruktionsmethoden. Aus diesen Abhängigkeiten ist erkennbar, dass die *Anwendbarkeit* und *Wirksamkeit* die Grundlage in der Validierung von Konstruktionsmethoden bilden.

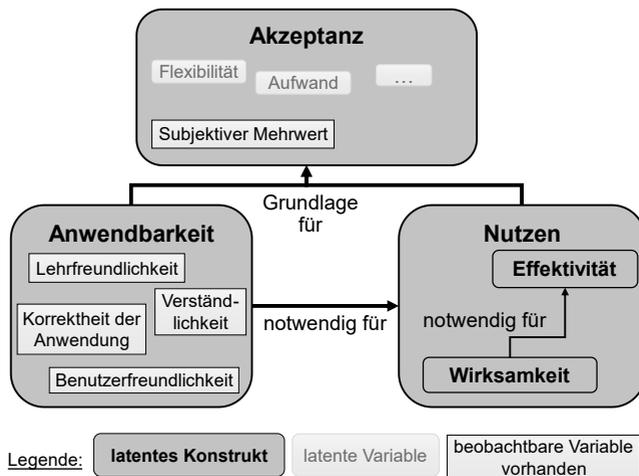


Abbildung 2.6: Visualisierung der Zusammenhänge zwischen den Erfolgskriterien *Anwendbarkeit*, *Nutzen* und *Akzeptanz* als latente Konstrukte. Innerhalb der Konstrukte sind Beispiele für bestehende latente und beobachtbare Variablen dargestellt. Für die beobachtbaren Variablen wurden diejenigen Beispiele ausgewählt, die unabhängig von der untersuchten Konstruktionsmethode eingesetzt werden können.

Daher soll der Fokus der Validierung zuerst auf der Untersuchung der *Anwendbarkeit* dann auf dem *Nutzen* und abschließend auf der *Akzeptanz* liegen. Durch eine Differenzierung des *Nutzens* wird klar, dass die Validierung von Konstruktionsmethoden sowohl in einem kontrollierten Umfeld zur Untersuchung der *Wirksamkeit* und im realen (oder einem realitätsnahen) Kontext zur Untersuchung der *Effektivität* erfolgen soll.

2.4.4.2 Inhaltliche Vergleichbarkeit auf Grundlage der Erfolgskriterien

Für die *Anwendbarkeit* und die *Akzeptanz* können auf verschiedene Konstruktionsmethoden übertragbare beobachtbare Variablen bereitgestellt werden. Der *Nutzen* ist immer spezifisch für das *Ziel*, den *Anwendungsbereich* und den angestrebten *Kontext* für die Anwendung der Konstruktionsmethode zu definieren. Die Möglichkeiten zur Übertragbarkeit von beobachtbaren Variablen sind daher begrenzt. Allerdings können zum Beispiel bei einer Vergleichbarkeit von *Zielen* unterschiedlicher Konstruktionsmethoden einheitliche beobachtbare Variablen für den *Nutzen* definiert werden.

2.5 Fazit zum Stand der Forschung

Die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung zur Vorgehensweise in der Validierung von Konstruktionsmethoden lassen sich in drei Schritte konsolidieren (vgl. Tabelle 2.3), die jeweils einen unterschiedlichen Fokus innerhalb der zu untersuchenden Erfolgskriterien setzen. Die Schritte und Erfolgskriterien sind in Form einer Übersichtsgrafik in Abbildung 2.7 zusammengefasst. Die *Struktur* der Konstruktionsmethode soll im ersten Schritt in einer theoretischen Validierung auf die logische Konsistenz ihres Aufbaus und der Einzelkomponenten geprüft werden (vgl. Blessing & Chakrabarti, 2009; Pedersen et al., 2000). Daran schließen sich die Schritte der empirischen Validierung der *Wirkung* und *Leistung* an.

In der empirischen Validierung sind die Erfolgskriterien *Anwendbarkeit*, *Nutzen* und *Akzeptanz* zu berücksichtigen. Dabei liegt der Fokus zu Beginn auf der *Anwendbarkeit*, dann auf dem *Nutzen* und dann auf der *Akzeptanz*, da die Kriterien aufeinander aufbauen (siehe Abbildung 2.6). Allerdings sollen sie als Erfolgskriterien möglichst während des gesamten Prozesses der Validierung kontinuierlich betrachtet werden. In der Validierung der *Wirkung* stehen die *Anwendbarkeit* und *Wirksamkeit* der Konstruktionsmethode im Fokus der Untersuchung. Die *Wirksamkeit* wird geprüft, indem die direkten Auswirkungen der Konstruktionsmethode in einem kontrollierten Kontext untersucht werden (vgl. Blessing & Chakrabarti, 2009; Daalhuizen & Cash, 2021; Marxen, 2014; Pedersen et al., 2000). In der Validierung der Leistung stehen

die *Effektivität* und *Akzeptanz* der Konstruktionsmethode im Fokus der Untersuchung. Die *Effektivität* wird geprüft, indem die indirekten Einflüsse der Konstruktionsmethode auf Erfolgsfaktoren in einem realen oder realitätsnahen Kontext – also in der Regel in Feldstudien – untersucht werden (vgl. Blessing & Chakrabarti, 2009; Daalhuizen & Cash, 2021; Marxen, 2014). Dieser Schritt ist aus Sicht von Pedersen et al. (2000) nicht als empirische Untersuchung notwendig, wenn eine ausreichende Übertragbarkeit der zuvor erreichten Ergebnisse auf die Praxis gewährleistet werden kann.

Die Schritte *Wirkung* und *Leistung* sind nicht als strikt getrennte Forschungsaktivitäten zu sehen. Sie beschreiben vielmehr Start- und Endpunkt der empirischen Validierung. Die Validierung von Konstruktionsmethoden soll mit einer Untersuchung direkter Auswirkungen in einem kontrollierten Umfeld beginnen (*Wirkung*) und mit für die Praxis relevanten indirekten Auswirkungen im Feld (*Leistung*) abgeschlossen werden. In der empirischen Validierung sind mehrere Studien mit unterschiedlicher Ausrichtung Ausrichtung innerhalb des Spektrums zwischen Start- und Endpunkt möglich.

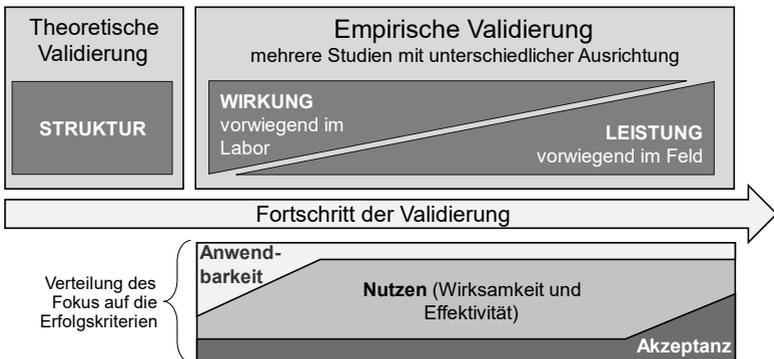


Abbildung 2.7: Grafische Zusammenfassung des Stands der Forschung zur Validierung von Konstruktionsmethoden. Validierung findet in zwei Phasen statt, der theoretischen und der empirischen Validierung. In diesen Phasen wird die Konstruktionsmethode in den drei Schritten *Struktur*, *Wirkung* und *Leistung* validiert. Die Studien innerhalb der empirischen Validierung untersuchen Erfolgskriterien der Konstruktionsmethode und fokussieren dabei zuerst auf *Anwendbarkeit*, dann auf *Nutzen* und dann auf *Akzeptanz*, da die Erfolgskriterien aufeinander aufbauen.

Insbesondere die Erfolgskriterien *Wirksamkeit* und *Effektivität* als Anteile des *Nutzens* der Konstruktionsmethode können aufgrund ihrer Verknüpfung mit den Zielen in Bezug auf den Anwendungskontext individuell ausgeprägt sein. Dadurch bedingt entsteht eine in Bezug auf den Untersuchungsgegenstand wenig vergleichbare Operationalisierung der Erfolgskriterien für den *Nutzen* einer Konstruktionsmethode. Durch den Zusammenhang zwischen Forschungsmethoden zur Datenerhebung und -analyse mit den zu untersuchenden beobachtbaren Variablen entsteht auf diese Weise gleichzeitig eine geringe Vergleichbarkeit der eingesetzten Forschungsmethoden. Diese geringe Vergleichbarkeit trägt zu der in der Einleitung (Kapitel 1) beschriebenen Unklarheit darüber bei, welche Forschungsmethoden für eine Validierung von Konstruktionsmethoden eingesetzt werden sollen.

Bestehende Ansätze zur Validierung von Konstruktionsmethoden unterstützen die individuelle Operationalisierung der Erfolgskriterien in Bezug zu einer einzelnen Konstruktionsmethode. Für eine Analyse der Vorgehensweisen innerhalb der aktuellen Forschungspraxis fehlt ein Überblick der Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden. Deshalb wird für die vorliegende Arbeit aus der Analyse des Stands der Forschung folgende Forschungslücke in Bezug auf die Vergleichbarkeit abgeleitet:

In bestehenden Ansätzen fehlen Vorgehensweisen für eine vergleichbare Operationalisierung der Erfolgskriterien für den Aufbau von Validierungsstudien zu Konstruktionsmethoden.

Für die Identifikation geeigneter Vorgehensweisen fehlt zudem ein Überblick zur aktuellen Forschungspraxis in der Validierung von Konstruktionsmethoden, der sowohl Untersuchungsinhalte als auch Forschungsmethoden einbezieht.

3 Motivation und Zielsetzung

In diesem Kapitel wird aufbauend auf dem Stand der Forschung die Motivation für weiterführende Forschung im Bereich der Validierung von Konstruktionsmethoden dargelegt. Zur Adressierung der in Kapitel 2.5 dargestellten Forschungslücke wird anschließend die Zielsetzung dieser Arbeit formuliert.

3.1 Motivation

Konstruktionsmethoden sind ein Kernergebnis der Konstruktionsforschung. Sie ermöglichen den Transfer von akademischen Erkenntnissen zu erfolgreichen Vorgehensweisen in die industrielle Unternehmenspraxis. Um ihr Potential in der Anwendung ausschöpfen zu können, müssen Anwendbarkeit, Nutzen und Akzeptanz der Konstruktionsmethoden sichergestellt werden, bevor diese in Unternehmen verbreitet und eingesetzt werden. Die Validierung von Konstruktionsmethoden sollte in der Konstruktionsforschung daher eine zentrale Rolle einnehmen. Von der Entwicklung bis zur Einführung in der Industrie werden Studien durchgeführt, um Belege für die Erfolgskriterien Anwendbarkeit, den Nutzen und die Akzeptanz einer Konstruktionsmethode zu sammeln. Zum Aufbau dieser Studien brauchen Forschende Klarheit darüber, welche Schritte in der Validierung zu unternehmen und welche Forschungsmethoden für den jeweiligen Schritt geeignet sind. Außerdem ist eine Festlegung des Inhalts der Untersuchung durch eine Operationalisierung der Erfolgskriterien notwendig, um diese für eine Erhebung und Analyse zugänglich zu machen.

Im Stand der Forschung ist auf übergeordneter Ebene ein etabliertes Vorgehen zur Validierung von Konstruktionsmethoden erkennbar (siehe Abbildung 2.7), das theoretische und empirische Anteile umfasst. In der empirischen Validierung wird die Auswahl von Studiendesigns durch Empfehlungen aus bestehenden Ansätzen für die beiden Schritte in der empirischen Validierung bereits eingeschränkt. Allerdings geben die Ansätze keinen Standard für den Aufbau einzelner Studien vor. Ein solcher Standard könnte die Vergleichbarkeit von Studien in Bezug auf Untersuchungsinhalte und Vorgehensweise befördern.

In anderen Fachdisziplinen wie der Medizin oder den Sozialwissenschaften gibt es hier bereits etablierte Standards. Diese beinhalten die Wahl des Studiendesigns als Rahmen für die Untersuchung genauso wie Methoden zur Datenerhebung und Datenanalyse. Im Forschungsdesign dieser Fachdisziplinen ist klar, welche Studien

aufeinander aufbauend durchgeführt werden sollen. Beispielsweise muss ein Impfstoff seine prinzipielle Wirksamkeit in Laboruntersuchungen beweisen, bevor klinische Studien mit Probanden durchgeführt werden können. Zusätzlich müssen nach der Einführung und Vermarktung kontinuierlich Nebenwirkungen ermittelt und gegebenenfalls Maßnahmen ergriffen werden. Diese Standards sind allerdings nur bedingt auf die Konstruktionsforschung übertragbar, da die den anderen Fachdisziplinen zugrundeliegenden Paradigmen beachtet und gegebenenfalls adaptiert werden müssen.

Ein Standard zu Forschungsmethoden ermöglicht es, vergleichbare Studien durchzuführen und aus der Reflexion der Ergebnisse übergeordnete Erkenntnisse abzuleiten. Werden die Ergebnisse bei erneuter Durchführung bestätigt, stärkt dies die Belege für die zuvor abgeleiteten Erkenntnisse. Im Falle einer Falsifizierung der Ergebnisse vorhergehender Studien können fehlerhafte Grundannahmen aufgedeckt und das gemeinsame Verständnis von zugrundeliegenden Argumenten weiterentwickelt werden. Die Belastbarkeit von Forschungsergebnissen kann also durch einen Standard für Forschungsmethoden erhöht werden. Das macht es erstrebenswert, einen solchen Standard für Forschungsmethoden in der Validierung von Konstruktionsmethoden und damit eine Grundlage für eine fundierte Beurteilung der entstehenden Ergebnisse zu etablieren. Eng verknüpft mit den angewandten Forschungsmethoden ist die zu untersuchende Fragestellung. Die Fragestellung befasst sich häufig mit latenten Variablen oder latenten Konstrukten, denen durch Operationalisierung geeignete Erhebungs- und Analysemethoden zugeordnet werden müssen, um sie einer Untersuchung zugänglich zu machen.

Dadurch, dass bisher kein Standard für Forschungsmethoden zur Datenerhebung und -analyse in der Validierung von Konstruktionsmethoden existiert, entstehen in einzelnen Validierungsstudien kaum vergleichbare Ergebnisse. Die Vergleichbarkeit dieser Ergebnisse ist jedoch notwendig, um die Erkenntnisse aus verschiedenen Studien zusammenführen zu können. Für Forschende bleibt es eine Herausforderung, geeignete Forschungsmethoden für die Validierung von Konstruktionsmethoden auszuwählen. Ein Grund ist eine fehlende Referenz zur Orientierung im Aufbau von Validierungsstudien. Gericke et al. (2017) kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass kein Konsens in der Konstruktionsforschung darüber besteht, welche Forschungsmethoden und Belege für eine umfassende Methodenvalidierung notwendig sind.

Die grundlegende Motivation dieser Arbeit besteht daher darin, einen Beitrag für die Entwicklung von Standards für Forschungsmethoden und Untersuchungsinhalte im Bereich der Validierung von Konstruktionsmethoden zu leisten.

3.2 Zielsetzung

Um den in der Einleitung beschriebenen Forschungsbedarf und die aus dem Stand der Forschung abgeleitete Forschungslücke zu adressieren, soll zur Unterstützung der Validierung von Konstruktionsmethoden ein Beitrag zur Standardisierung des Vorgehens zum Aufbau vergleichbarer Studien erarbeitet werden. Als erste Grundlage für einen Standard soll ein Referenzprozess dienen, der eine Referenz für das Vorgehen bereitstellt. Ein Referenzprozess bietet Forschenden eine Orientierung durch die Vorgabe grundlegender Vorgehensweisen für den Aufbau von Studien. Dabei soll er gleichzeitig generisch genug sein, um eine Anpassung auf die eigene Fragestellung zu ermöglichen. Ein Referenzprozess kann sich durch wiederholte Anwendung in der Forschungsgemeinschaft zu einem Standardprozess entwickeln. Er stellt also einen ersten Schritt in Richtung Standardisierung dar. Daher soll in dieser Arbeit ein Referenzprozess für Validierungsstudien zu Konstruktionsmethoden entwickelt werden.

Eine reine Erhöhung der Vergleichbarkeit ist nicht zielführend, wenn die Qualität der entstehenden Validierungsstudien nicht gewährleistet wird. Um als Grundlage für einen Standard dienen zu können, besteht die Grundanforderung an einen solchen Referenzprozess, die Qualität der durch ihn aufgebauten Validierungsstudien zu berücksichtigen.

Für diese Arbeit wird daher folgende Zielsetzung abgeleitet:

Ziel ist die Entwicklung eines Referenzprozesses für die Validierung von Konstruktionsmethoden.
Der Referenzprozess soll Forschenden ein geeignetes Vorgehen und Empfehlungen für den Aufbau von Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden bereitstellen, die zur Vergleichbarkeit der Operationalisierung des Nutzens von Konstruktionsmethoden beitragen.

4 Forschungsfragen und Forschungsdesign

In diesem Kapitel werden Forschungsfragen zum übergeordneten Forschungsziel abgeleitet und das Forschungsdesign zu deren Beantwortung vorgestellt.

4.1 Forschungsfragen

Zur Entwicklung des Referenzprozesses soll zuerst ein Überblick der aktuellen Forschungspraxis gewonnen werden, um bestehende Herausforderungen und bewährte Vorgehensweisen identifizieren zu können. Im zweiten Schritt sollen Erkenntnisse aus dem ersten Schritt sowie bestehende Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung zur Validierung von Konstruktionsmethoden für die Synthese eines Referenzprozesses genutzt werden. Dieser Referenzprozess soll in einem dritten Schritt evaluiert werden.

Ein Überblick zur aktuellen Praxis der Validierung von Konstruktionsmethoden ist für die Entwicklung eines Referenzprozesses aus zwei Gründen notwendig: Zum einen, um einen Ansatzpunkt zu identifizieren, wo ein Referenzprozess sinnvoll zur Unterstützung eingesetzt werden soll. Zum anderen können geeignete Strategien für den Referenzprozess aus den aktuell angewandten Vorgehensweisen abgeleitet werden. Dazu muss detaillierter analysiert werden, welche Herausforderungen aktuell in der Konzeption und Durchführung von Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden bestehen. Bisher gibt es jedoch keinen Überblick dazu, wie die Validierung von Konstruktionsmethoden stattfindet. Daher leitet sich die erste Forschungsfrage mit der Untergliederung in zwei weitere Teilforschungsfragen wie folgt ab:

1. Wie werden Konstruktionsmethoden aktuell im Hinblick auf Vergleichbarkeit von Studien validiert?
 - 1.1. Wie vergleichbar sind aktuelle Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden?
 - 1.2. Was sind Herausforderungen im Aufbau von vergleichbaren Studien und wie werden diese überwunden?

Die Ergebnisse aus Forschungsfrage 1 sollen genutzt werden, um die Entwicklung des Referenzprozesses zu fokussieren. Wie in Kapitel 2 erläutert enthalten bestehende Ansätze bereits Elemente, die zur Studienqualität und einer höheren Vergleichbarkeit des Vorgehens beitragen können. Diese Elemente sollten daher als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Referenzprozesses genutzt werden. Auf diese Weise kann eine Anknüpfung an die bestehenden, bereits bekannten Ansätze stattfinden. Die Ergebnisse aus Forschungsfrage 1.1 können bei einer Auswahl geeigneter Elemente unterstützen. Die in Forschungsfrage 1.2 identifizierten Strategien können die Grundlage für eine detailliertere Beschreibung der Vorgehensweise zum Aufbau einzelner Studien darstellen. Es sollte also eine zielführende Kombination aus den im Vorfeld dieser Arbeit entstandenen Erkenntnissen zur Methodvalidierung (siehe Kapitel 2) und den aus der Analyse von Validierungsstudien gewonnenen Erkenntnissen aus Forschungsfrage 1 stattfinden. Die Entwicklung des Referenzprozesses ist Gegenstand der zweiten Forschungsfrage:

2. Wie können die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung und aus der Analyse der aktuellen Forschungspraxis zur Methodvalidierung in einem Referenzprozess zur Unterstützung des Aufbaus von vergleichbaren Studien kombiniert werden?

Der entwickelte Referenzprozess stellt eine Form der Unterstützung für Forschende dar und muss deshalb im Hinblick auf seine Wirkungen evaluiert werden. Der Referenzprozess soll Forschenden eine Orientierung für den Aufbau von Studien geben und gleichzeitig die Vergleichbarkeit von Validierungsstudien zu Konstruktionsmethoden erhöhen. Daraus leitet sich die dritte Forschungsfrage ab:

3. Welchen Einfluss hat die Anwendung des Referenzprozesses auf die Qualität und die Vergleichbarkeit von Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden?

Zusammenfassend werden durch die Beantwortung von Forschungsfrage 1 Ansatzpunkte für einen Referenzprozess und erfolgreiche Strategien zur Überwindung von bestehenden Herausforderungen identifiziert. Forschungsfrage 2 befasst sich mit der Synthese eines Referenzprozesses, der wiederum in Forschungsfrage 3 in Bezug auf seine Eignung evaluiert wird.

4.2 Forschungsdesign und angestrebte Ergebnisse

Das Forschungsdesign (siehe Abbildung 4.1) wird in drei Studien strukturiert, die im Folgenden näher erläutert werden.

Im Rahmen der *ersten deskriptiven Studie* wird die erste Forschungsfrage adressiert. Es soll darin ein Verständnis über die aktuelle Forschungspraxis aufgebaut werden. Dazu wird eine zweistufige Literaturstudie zu in etablierten Journals innerhalb der Jahre 2010-2020 veröffentlichten Beiträgen durchgeführt. Im ersten Schritt werden in diesem Zeitraum durchgeführte Studien kategorisiert. Dadurch soll die Analyse zur Vergleichbarkeit in Bezug zum Studiendesign im jeweiligen Validierungsschritt unterstützt werden. Anschließend sollen ausgewählte Studien innerhalb der Stichprobe analysiert werden, um Herausforderungen für die Vergleichbarkeit in Bezug auf das Vorgehen und die Inhalte einzelner Studien sowie erfolgreiche Strategien zu deren Überwindung zu identifizieren.

	Aktivitäten/ Forschungsmethoden	Angestrebte Ergebnisse
Forschungsfrage 1: Erste deskriptive Studie	Identifikation und Klassifikation von Validierungsstudien	Nach Studiendesign und Validierungsschritt klassifizierte Studien
	Analyse der Vorgehensweisen in ausgewählten Studien	Herausforderungen und Strategien zur Überwindung
Forschungsfrage 2: Präskriptive Studie	Synthese eines Referenzprozesses	Referenzprozess zur Unterstützung im Aufbau von Validierungsstudien
Forschungsfrage 3: Zweite deskriptive Studie	Evaluation des Referenzprozesses	Einschätzung zur Eignung des Referenzprozesses in Bezug auf erreichte Studienqualität und Vergleichbarkeit
	Qual. Validierungsstudie	
	Quant. Validierungsstudie	

Abbildung 4.1: Forschungsdesign der vorliegenden Arbeit zur Entwicklung und initialen Evaluation eines Referenzprozesses zur Unterstützung des Aufbaus von vergleichbaren Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden

In der *präskriptiven Studie* wird Forschungsfrage 2 durch die Synthese eines Referenzprozesses adressiert. Dazu werden Elemente aus bestehenden Ansätzen mit

in der *ersten deskriptiven Studie* identifizierten Strategien und Erkenntnissen kombiniert. Der Referenzprozess soll sowohl qualitative als auch quantitative Untersuchungen für die Validierung von Konstruktionsmethoden unterstützen, weshalb für beide Sichtweisen mindestens eine Studie beinhaltet sein soll. Ergebnis ist ein Referenzprozess für den Aufbau von vergleichbaren Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden.

In der *zweiten deskriptiven Studie* wird die dritte Forschungsfrage durch eine Evaluation des entwickelten Referenzprozesses adressiert. Dazu soll der Referenzprozess exemplarisch angewandt werden, um Studien zur Validierung einer Konstruktionsmethode zu konzipieren, durchzuführen und auszuwerten. Um die Eignung des entwickelten Referenzprozesses zu erfassen, werden eine qualitative und eine quantitative Studie im Hinblick auf den Beitrag zur Qualität und zur Vergleichbarkeit von Validierungsstudien evaluiert.

5 Erste deskriptive Studie – Analyse der aktuellen Methodvalidierung

In diesem Kapitel wird die erste deskriptive Studie beschrieben, die folgenden Forschungsfragen adressiert:

1. Wie werden Konstruktionsmethoden aktuell im Hinblick auf Vergleichbarkeit von Studien validiert?
 - 1.1. Wie vergleichbar sind aktuelle Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden?
 - 1.2. Was sind Herausforderungen im Aufbau von vergleichbaren Studien und wie werden diese überwunden?

In diesem Kapitel werden zunächst die beiden Teilforschungsfragen 1.1 und 1.2 anhand eines zweistufigen Literaturreviews beantwortet, das wie folgt aufgebaut ist: In Kapitel 5.1 wird die Vorgehensweise für das Literaturreview beschrieben. In Kapitel 5.2 werden die Ergebnisse des Literaturreviews vorgestellt und diskutiert. Zum einen wird ein Überblick zur aktuellen Praxis der Validierung von Konstruktionsmethoden gegeben und ein Stand zur Vergleichbarkeit aktueller Studien abgeleitet (Kapitel 5.2.1). Zum anderen werden Herausforderungen sowie Strategien zu deren Bewältigung beschrieben und diskutiert (Kapitel 5.2.2). Kapitel 5.3 fasst die gewonnenen Erkenntnisse zu geeigneten Strategien für die Validierung von Konstruktionsmethoden in einem Fazit zusammen.

Dieses Kapitel basiert auf der Veröffentlichung „Design method validation – an investigation of the current practice in design research“ (Eisenmann, Grauberger, Üreten et al., 2021). Kapitel 5.1 zur Vorgehensweise für das Literaturreview (Abschnitt 3 im Original) sowie Kapitel 5.2 zu Ergebnissen und Diskussion (Abschnitt 4 im Original) sind in Teilen aus der Originalveröffentlichung nach Übersetzung sinngemäß übernommen und Nummerierungen sowie Begrifflichkeiten auf diese Arbeit angepasst.

5.1 Vorgehensweise für die Literaturstudie

Die Literaturstudie folgt einem zweistufigen Verfahren mit einem *Mixed-Methods* Ansatz (Grant & Booth, 2009), der in Abbildung 5.1 dargestellt ist. Zur Beantwortung

von Forschungsfrage 1.1 wird ein *Systematic Mapping* (Grant & Booth, 2009) (systematische Kategorisierung) durchgeführt, um einen Überblick zur aktuellen Praxis der Validierung von Konstruktionsmethoden zu erhalten. Zur Kategorisierung werden die Schritte in der Validierung von Konstruktionsmethoden und Evidenzstufen verwendet. Zur Beantwortung von Forschungsfrage 1.2 wird ein Analyse in einem *State-of-the-Art Review* (Grant & Booth, 2009) ausgewählter Studien aus der Kategorisierung durchgeführt, um Herausforderungen für die Vergleichbarkeit in Bezug auf das Vorgehen und die Inhalte einzelner Studien sowie erfolgreiche Strategien zu deren Überwindung zu identifizieren. Durch Kriterien für das Review (siehe Kapitel 5.1.2) sollen Vorgehensweisen für die Erhöhung der Vergleichbarkeit von Validierungsstudien in Bezug zum Inhalt und der Vorgehensweise identifiziert werden.

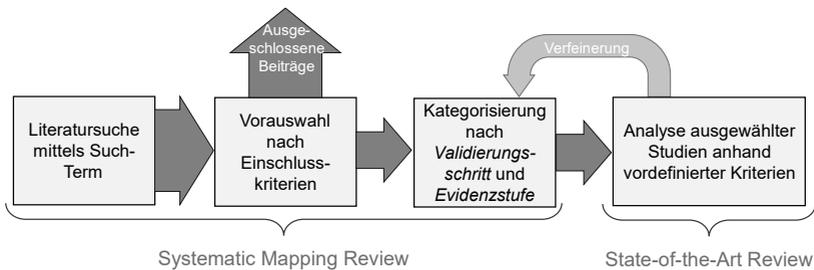


Abbildung 5.1: Vorgehen für die zweistufige Literaturstudie zur Analyse der aktuellen Forschungspraxis. Die Klassifikation im *Systematic Mapping Review* dient dazu, einen Überblick zur aktuellen Forschungspraxis über eine Kategorisierung nach Evidenzstufe in Bezug auf das Studiendesign und die durch den Validierungsschritt vorgegebene Zielsetzung der identifizierten Studien zu bekommen. Im *State-of-the-Art Review* werden dann auf Grundlage der Kategorisierung ausgewählte Studien im Hinblick auf Vorgehensweisen und Strategien analysiert.

5.1.1 Auswahl und Systematische Kategorisierung

Das Verfahren zur Kategorisierung basiert auf dem von Petersen et al. (2008) beschriebenen *systematic mapping* Prozess, dessen grundlegendes Vorgehen übernommen wurde. Anstatt wie dort beschrieben Kategorien während des Reviews zu

identifizieren, werden die konsolidierten Schritte in der Validierung von Konstruktionsmethoden (siehe Kapitel 2.3.5) und Evidenzstufen (Erläuterung siehe Kapitel 5.1.1.2) für die Klassifizierung verwendet. Auf diese Weise wird eine Analyse der Vergleichbarkeit auf Ebene des Studiendesigns im jeweiligen Validierungsschritt ermöglicht. Dadurch wird eine Einschätzung zur Vergleichbarkeit des Vorgehens innerhalb der Validierung möglich. Um relevante Literatur zu identifizieren, wurden mehrere Journals, die sich mit Konstruktionsforschung befassen, ausgewählt: *Design Studies*, *Research in Engineering Design* (RIED), *International Journal of Design* (IJD), *Journal of Engineering Design* (JED), und *Design Science*. *Design Studies*, RIED, IJD und JED wurden ausgewählt, da sie zu den zehn wichtigsten Journals im Bereich der Konstruktionsforschung gehören (Gemser et al., 2012), die explizit Forschung zu Konstruktionsmethoden und Konstruktionsmethodik in ihrem Fokus oder in häufig verwendeten Schlüsselwörtern enthalten. *Design Science* wurde als ein relativ neues Journal aufgenommen, das potentiell andere Ansätze zur Validierung von Konstruktionsmethoden im betrachteten Fokus zu Konstruktionsmethoden bietet. Die Journal-Auswahl ist als Stichprobe zu verstehen, die dazu dient, einen Einblick in die Forschungsaktivitäten zur Validierung von Konstruktionsmethoden zu erhalten, und nicht als umfassende Auflistung von Studien zur Vorstellung und Validierung von Konstruktionsmethoden im Untersuchungszeitraum.

5.1.1.1 Ermittlung der relevanten Beiträge

Zur Betrachtung der aktuellen Praxis wurden Beiträge aus den Jahren 2010 - 2020 einbezogen. Als Rechercheplattform wurde Scopus gewählt, da dort alle der ausgewählten Journals vertreten sind. Der Such-Term wurde so entwickelt, dass so viele Validierungsaktivitäten wie möglich gefunden werden konnten. Wie in Kapitel 2.2 erläutert, wird in der Konstruktionsforschung der Begriff „Konstruktionsmethode“ nicht konsistent verwendet. Daher wurden die Schlagwörter in den Journals, die sich auf Konstruktionsmethoden und deren Validierung beziehen können, analysiert, um initiale Suchbegriffe zu ermitteln. Diese Begriffe wurden dann zur Suche nach analog verwendeten Begriffen in den Journals genutzt, was zu folgendem Such-Term führte:

(“design method” OR “development method*” OR “design technique*” OR “design strateg*”) AND (“validat*” OR “evaluat*” OR “assess*” OR “verif*”)*

Anschließend wurden die ermittelten Beiträge einem Auswahlverfahren unterzogen. Um die Beiträge auszuschließen, die nicht im Betrachtungsrahmen „Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden“ lagen, wurden sie inhaltlich geprüft. Erfüllte ein Beitrag nicht gleichzeitig beide der folgenden Einschlusskriterien, wurde er ausgeschlossen:

- 1) Beitrag beschreibt Forschung zu Konstruktionsmethoden
- 2) Beitrag beschreibt eine Validierungsaktivität (d.h. eine Untersuchung dazu, ob die Konstruktionsmethode ihren Zweck erfüllen kann)

Für das Auswahlkriterium 1 wurde zur Unterscheidung zwischen Konstruktionsmethoden und anderen Typen von Unterstützung die Abgrenzung in Tabelle 2.2 verwendet.

5.1.1.2 Kategorisierung der Beiträge

Die nach Anwendung der Auswahlkriterien verbleibenden Veröffentlichungen wurden anschließend durch *Validierungsschritte* und *Evidenzstufen* kategorisiert. Die Kategorisierung erfolgte auf Basis der Beschreibungen in Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2. Innerhalb des Validierungsschritts *Validierung der Effektivität* wurde weiter differenziert, um auch Untersuchungen einzubeziehen, die über eine *Validierung der Wirksamkeit* hinausgehen, aber dennoch in einem kontrollierten Umfeld durchgeführt wurden (siehe Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Kategorisierung von Validierungsschritten basierend auf der Konsolidierung in Tabelle 2.3

Validierungsschritt	Beschreibung
Struktur	Untersuchung zur Anwendbarkeit oder logischen Konsistenz der Konstruktionsmethode. Die Anwendung der Konstruktionsmethode wird auf theoretischer Ebene durch Beispiele oder Argumente veranschaulicht.
Wirkung	Es werden direkte Wirkungen der Methode untersucht, d.h. auf das vorgegebene Ergebnis der Methode (z.B. beim Brainstorming: Anzahl der generierten Ideen)
Leistung	Die indirekten Wirkungen der Konstruktionsmethode auf den Erfolg wird untersucht, d.h. der Einfluss auf ein Ergebnis innerhalb der Konstruktion (z.B. im Design for Manufacturing, reduzierte Montagekosten des eigentlichen Produktes)
<ul style="list-style-type: none">• Labor• Feld	<ul style="list-style-type: none">Untersuchung in einem kontrollierten KontextUntersuchung eines realen Konstruktionsprozesses in einem Unternehmen

Die Kategorisierung in Evidenzstufen (siehe Tabelle 5.2) verfolgt das Ziel, die verwendeten Studiendesigns gegenüber den verschiedenen Validierungsschritten aufzuschlüsseln. Auf diese Weise kann sichtbar gemacht werden, ob bereits eine Vergleichbarkeit in der Wahl des Studiendesigns in einem der betrachteten Schritte besteht. Über das verwendete Studiendesign lassen sich zudem Rückschlüsse auf die Art der erzielten Ergebnisse und Belege ziehen. Die Rückkopplung zwischen Studiendesign und Bewertung der erzielbaren Ergebnisse basiert auf Forschungsmethoden der evidenzbasierten Medizin.

Burns et al. (2011) beschreiben, wie eine Einschätzung der Belege aus Studien zur Wirksamkeit von medizinischen Behandlungen in der evidenzbasierten Medizin durch das verwendete Studiendesign beeinflusst wird. Diese Einschätzung wird in Form von Evidenzstufen beschrieben, die Forschenden eine Beurteilung der Forschungsergebnisse und Belege ermöglicht. Die Evidenzstufen können je nach Fachgebiet der Untersuchung modifiziert werden (Burns et al., 2011). In der Konstruktionsforschung geht es – wie bei medizinischen Behandlungen – darum, Wirkungen der untersuchten Maßnahme auf den Menschen zu untersuchen. Medizinische Behandlungen erreichen dies, indem sie direkt auf den menschlichen Körper einwirken, um positive Veränderungen der Gesundheit zu bewirken. Konstruktionsmethoden zielen darauf ab, das Verhalten und Denken von Konstruierenden zu verändern, um das Ergebnis einer bestimmten Tätigkeit während des Konstruktionsprozesses zu beeinflussen. In beiden Fällen müssen die Forschenden sicher sein, dass die von ihnen gewählte "Behandlung" die Ursache für eine messbare Wirkung ist. In Anlehnung an die von Frey und Dym (2006) beschriebene Analogie zwischen medizinischer Behandlung und Konstruktionsmethode (vgl. Kapitel 2.3.4) scheinen Evidenzstufen geeignet, um das Studiendesign mit einer Bewertung der erzielbaren Belege in Beziehung zu setzen. Evidenzstufen werden daher verwendet, um Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden auf der Grundlage ihres Studiendesigns zu klassifizieren.

Die Kategorisierung in Evidenzstufen wurde aus der Beschreibung der Forschungsmethode in der jeweiligen Veröffentlichung erfasst. Evidenzstufen für therapeutische Studien (Burns et al., 2011) wurden als Grundlage für eine Modifikation auf den Kontext der Konstruktionsforschung ausgewählt (siehe Tabelle 5.2), da die Bewertung therapeutischer Maßnahmen ähnlichen Randbedingungen wie die Validierung der Unterstützung durch Konstruktionsmethoden unterliegt. Im ersten Schritt der Modifikation wurden Unterkategorien der beschriebenen Evidenzstufen zusammengefasst, da eine so feine Untergliederung für das Forschungsziel, einen Überblick zu gewinnen, als nicht sinnvoll erachtet wurde. Die zusammengefassten Stufen wurden dann auf den Kontext der Konstruktionsforschung angepasst. Dies fand auf zwei Arten statt:

- 1) Identifikation entsprechender Studiendesigns in der Konstruktionsforschung, die mit denjenigen in der Medizin vergleichbar sind, um sie zu ersetzen (z.B. sind Kohortenstudien in der evidenzbasierten Medizin vergleichbar zu Probandenexperimenten, und Fallkontrollstudien sind ähnlich zu vergleichenden Fallstudien).
- 2) Hinzufügen von in der Konstruktionsforschung üblichen Studiendesigns zu den Stufen, wie z. B. die Verwendung von Fallbeispielen zur Illustration, um den potenziellen Wert einer Konstruktionsmethode aufzuzeigen.

Dies führte zu einer vereinfachten und angepassten Version der Evidenzstufen, die für die Kategorisierung verwendet wurde (siehe Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Evidenzstufen für Validierungsstudien – Anpassung im Vergleich zu den Evidenzstufen für therapeutische Studien des Zentrums für evidenzbasierte Medizin, wie sie in Burns et al. (2011) beschrieben sind.

Stufe	Studiendesign	Stufe	Studiendesign
1A	Systematisches Review (SR) von randomisierten kontrollierten Studien (RCT)	I	Mehrere RCTs oder Meta-Analysen von RCTs
1B	Einzelne RCT		
1C	All-or-none RCT		
2A	SR von Kohortenstudien	II	Experiment (einschließlich RCT)
2B	Einzelne Kohortenstudie (oder RCT mit niedriger Qualität)		
2C	"Outcomes" research; Ecological studies		
3A	SR von Fall-Kontroll-Studien	III	Vergleichs- oder Korrelationsstudie
3B	Einzelne Fall-Kontroll-Studie		
4	Fallserie	IV	Deskriptive Fallstudie
5	Expertenmeinung	V	Expertenmeinung oder illustratives Fallbeispiel

Im Folgenden werden die Merkmale der einzelnen Evidenzstufen für die Validierung von Konstruktionsmethoden erläutert, beginnend mit der untersten Stufe:

Stufe V beschreibt Expertenmeinungen oder illustrative Fallbeispiele, die keine tatsächliche Anwendung einer Konstruktionsmethode durch Konstruierende beinhalten. Daraus ergibt sich ein Mangel an empirischen Belegen für den Nutzen der Konstruktionsmethode. Von Forschern eingeführte illustrative Fallbeispiele können lediglich die Anwendung von Konstruktionsmethoden veranschaulichen und somit eine Diskussion über die Erfolgskriterien ermöglichen.

Auf Stufe IV werden die Konstruktionsmethoden von den Konstruierenden tatsächlich angewandt und auf deskriptive Weise untersucht. Ohne den Vergleich der beobachteten Wirkungen während der Anwendung der Konstruktionsmethode mit einer ähnlichen Situation ohne Anwendung der Konstruktionsmethode können die Wirkungen jedoch nicht direkt auf die untersuchte Konstruktionsmethode zurückgeführt werden.

Dieser Vergleich zwischen Kontroll- und Testgruppe wird auf Stufe III durch die Einführung einer Kontrollgruppe hergestellt, die eine ähnliche Konstruktionsaufgabe durchführt, ohne eine Konstruktionsmethode zu verwenden – oder die stattdessen eine Benchmark- oder Placebo-Methode verwendet. Allerdings bleiben die Studiendesigns auf dieser Stufe deskriptiv, wodurch eine Ableitung kausaler Zusammenhänge nicht möglich ist. Es ergeben sich Korrelationen zwischen der Anwendung der Methode und den beobachteten Effekten. Diese Korrelationen bilden die Grundlage für die Formulierung von Hypothesen über die positiven Auswirkungen von Konstruktionsmethoden.

Kausale Zusammenhänge können nur auf Stufe II aufwärts durch die Durchführung von Experimenten gewonnen werden, die darauf abzielen, Hypothesen über die gewünschten Wirkungen der Konstruktionsmethoden zu testen. Dazu gehört die Kontrolle möglicher Störfaktoren, um die Ergebnisse der Experimente ausschließlich auf die Methode und ihre gewünschten Wirkungen zu fokussieren.

Stufe I erweitert Stufe II um eine mehrfache Replikation. Dies ermöglicht eine Reflexion der Ergebnisse in Meta-Analysen, die weiterführende Einblicke z.B. in Einflüsse von Probandenmerkmalen oder die Identifizierung möglicher Schwachstellen erlauben.

Die Einteilung in Evidenzstufen sagt nichts über die Qualität der Forschung im Allgemeinen oder den wissenschaftlichen Beitrag der untersuchten Studien aus. Deskriptive Fallstudien beispielsweise leisten einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis von Konstruktionsprozessen und zur Gewinnung detaillierter Informationen

über die Anwendung von Methoden, da sie sich nicht auf einzelne Aspekte konzentrieren. Fallstudien sind besonders hilfreich, um Phänomene zu identifizieren, die nur in einem Praxiskontext beobachtbar sind (Teegavarapu et al., 2009), denn sie sind ein wichtiger Bestandteil einer umfassenden Validierung von Konstruktionsmethoden. Zur Validierung einer Konstruktionsmethode sind jedoch auch Vergleichsstudien, wie von Tromp und Hekkert (2016) beschrieben, und verlässliche Zusammenhänge zwischen Konstruktionsmethode und Ergebnis (Blessing & Chakrabarti, 2009) notwendig. Um verlässliche Ergebnisse zu kausalen Zusammenhängen von Methode und Wirkung zu erhalten, sollten daher zielgerichtete Untersuchungen wie in den Stufen II und I angestrebt werden.

Die beschriebene Kategorisierung in Evidenzstufen ermöglicht die Berücksichtigung erforderlicher Komponenten bei der Validierung von Konstruktionsmethoden, die mit Hilfe der Einordnung in Validierungsschritte verschiedenen Phasen und Zielen der Validierung zugeordnet werden können.

5.1.2 Review kategorisierter Studien

Ziel des Reviews ist es, Herausforderungen im Zusammenhang mit Vergleichbarkeit in der Methodenvalidierung zu identifizieren und geeignete Strategien zu deren Überwindung aus den in der Kategorisierung identifizierten Beiträgen abzuleiten.

Um herauszufinden, wie Forscher die Herausforderungen bei der Validierung von Konstruktionsmethoden angehen, wurden in einem zweiten Schritt die Validierungsaktivitäten genauer betrachtet. Die durch die systematische Kategorisierung gewonnene Übersicht wurde als Grundlage verwendet, um die Analyse zu fokussieren. Durch die individuelle Betrachtung jedes Validierungsschritts sollen die Herausforderungen spezifisch für den jeweiligen Schritt identifiziert werden. Die Einteilung in Evidenzstufen ermöglicht zudem eine Analyse, wie und warum die entsprechenden Forschungsmethoden eingesetzt wurden.

Um Zusammenhänge zwischen der Anwendung der Methode und dem Erfolg des Konstruktionsprozesses herzustellen, ist eine Operationalisierung des gewünschten Ergebnisses in Kriterien erforderlich. Die Operationalisierung legt auch den Fokus für die Validierung fest, da verschiedene Kriterien Ergebnisse auf verschiedenen Ebenen adressieren können, von einem einzelnen Schritt bis hin zum Erfolg des gesamten Konstruktionsprozesses. Um die Validierung von Konstruktionsmethoden gezielt durchführen zu können, müssen die übergeordneten Kriterien weiter operationalisiert werden, um eine objektive Beobachtung und Messung zu ermöglichen.

Daher wurde das Review anhand von Kriterien durchgeführt, die sich auf den Zusammenhang zwischen den Zielen der untersuchten Konstruktionsmethode und eingesetzten Forschungsmethoden konzentrieren:

1) *Rahmen der Methodvalidierung*

Dieses Kriterium zielt darauf ab, den Rahmen der Validierung genauer zu verstehen. Dazu gehört, welche Erfolgskriterien untersucht wurden und wie die Studenumgebung gestaltet wurde, um den anvisierten Kontext der Methode abzubilden.

2) *Ziele der Konstruktionsmethode*

Dieses Kriterium richtet sich auf die inhaltliche Vergleichbarkeit zwischen Konstruktionsmethoden und zusätzlich einen Ansatzpunkt zum Abgleich von Vorgehensweisen zur Untersuchung ähnlicher Zielsetzungen.

3) *Beobachtbare Variablen für die Validierung*

Beobachtbare Variablen stellen die detaillierteste Ebene der Operationalisierung bei der Untersuchung von Konstruktionsmethoden und ihren Auswirkungen dar. Durch die Analyse ihres Zusammenhangs mit den *Zielen von Konstruktionsmethoden* und dem *Rahmen der Methodvalidierung* kann die Operationalisierung und ihre Umsetzung im Studiendesign analysiert werden.

4) *Verbindungen zu vergleichbaren Forschungsarbeiten (eigene Ergebnisse, Ergebnisse anderer Forscher oder Verbindungen zur Theorie)*

Dieses Kriterium zielt insbesondere darauf ab, zu ermitteln, welche Herausforderungen sich aus der Verfügbarkeit von Wissen über die Methodvalidierung für den gewählten Kontext ergeben. Dazu gehören Erkenntnisse über die Konstruktion im Stand der Forschung und über die Verfügbarkeit etablierter Forschungsmethoden.

Diese Kriterien helfen dabei, die Studien aus der kategorisierten Übersicht detaillierter auf Gemeinsamkeiten zu analysieren, die für eine Erhöhung der Vergleichbarkeit hilfreich sein können. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden die Herausforderungen bei der Validierung von Konstruktionsmethoden abgeleitet und mögliche Ansätze und Strategien aufgezeigt, die von Forschern zu deren Bewältigung eingesetzt werden.

5.2 Ergebnisse und Diskussion

In Kapitel 5.2.1 werden die Ergebnisse der systematischen Kategorisierung präsentiert und diskutiert, um einen Überblick über die aktuelle Forschungspraxis zu geben

und Teilforschungsfrage 1.1 zu beantworten. Kapitel 5.2.2 beschreibt die Ergebnisse aus der Analyse im *State-of-the-Art Review* ausgewählter Beiträge aus der Kategorisierung und diskutiert diese auf einer detaillierteren Ebene, um anschließend Teilforschungsfrage 1.2 zu beantworten.

5.2.1 Überblick der aktuellen Forschungspraxis

5.2.1.1 Ermittlung der relevanten Beiträge

Die Literatursuche auf Scopus im März 2020 ergab insgesamt 456 Beiträge. Eine Übersicht über die Anzahl der gefundenen Beiträge in den untersuchten Journals ist in Tabelle 5.3 dargestellt. Nach dem Auswahlverfahren anhand der Einschlusskriterien blieben 52 Beiträge zur Kategorisierung übrig. Die meisten Beiträge wurden ausgeschlossen, weil sie das Kriterium "Beschreibung von Forschung zu Konstruktionsmethoden" nicht erfüllten (382). Weitere 22 Studien wurden ausgeschlossen, weil sie Forschungsaktivitäten zu einer Konstruktionsmethode ohne Validierung beschrieben, also beispielsweise zu deren Entwicklung oder einer reinen Beschreibung der Anwendung ohne Bewertung.

Tabelle 5.3: Übersicht zur Anzahl der Beiträge nach der Suche und nach dem Auswahlverfahren zugeordnet zum jeweiligen Journal.

	<i>Design Science</i>	<i>Design Studies</i>	<i>IJD</i>	<i>JED</i>	<i>RIED</i>	Gesamt
Nach Suche	33	114	37	147	125	456
Nach Auswahlverfahren	2	14	5	12	19	52

5.2.1.2 Kategorisierung der Beiträge

Die 52 resultierenden Beiträge beschreiben 54 Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden, da zwei der Beiträge zwei separate Validierungsstudien enthielten, die nacheinander durchgeführt wurden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Kategorisierung in die Kategorien Validierungsschritt und Evidenzstufen ist in Tabelle 5.4 dargestellt (die vollständigen Ergebnisse der Kategorisierung finden sich in Tabelle A.1.1 im Anhang).

Tabelle 5.4: Ergebnisse der Kategorisierung von Validierungsstudien

<i>Evidenzstufe</i>	<i>Validierungsschritt</i>				Gesamt
	Struktur	Wirkung	Leistung		
			(Labor)	(Feld)	
(I) Meta-Analyse	-	-	-	-	0
(II) Experiment	-	7	1	-	8
(III) Vergleichsstudie	1	6	-	1	8
(IV) Deskriptive Studie	-	9	3	2	14
(V) Expertenmeinung/ illustratives Fallbeispiel	14	5	3	2	24
Gesamt	15	27	7	5	54

Es ist ersichtlich, dass der Rahmen der Validierung in Bezug auf den Validierungsschritt häufig auf die Validierung der Wirkung (27) oder die Strukturvalidierung (15) beschränkt ist. Die Validierung der Leistung wurde in 12 Studien adressiert, davon sieben in einer Laborumgebung und fünf im Feld.

Wenn die Validierung auf die Struktur beschränkt ist, werden Validierungsaktivitäten in der Regel begleitend zur Entwicklung der Konstruktionsmethode durchgeführt (vgl. Kapitel 2.3). Während der Methodenentwicklung sind Vergleichsstudien nicht zielführend, da zunächst untersucht werden muss, ob die Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode ausreichend ist. Für die Untersuchung der Anwendbarkeit ist es notwendig zu wissen, wie die Konstruktionsmethode ihr Ziel erreichen soll. Experten können hier im Hinblick auf die Tätigkeit, die durch die Konstruktionsmethode unterstützt wird, spezifische Aspekte der Ansätze der Studienteilnehmer aufzeigen. Nichtsdestotrotz können Probandenexperimente in dieser Phase nützlich sein, wenn es einen bestehenden Benchmark gibt, z. B. wenn verschiedene Varianten einer Konstruktionsmethode oder verschiedene Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit miteinander verglichen werden.

Die Validierung der Wirkung hat das Ziel, die direkten Auswirkungen der Methoden-anwendung auf die Konstruktion zu untersuchen. Im Vergleich zur Validierung der Leistung wird bei der Validierung der Wirkung der Einfluss möglicher Störgrößen durch Untersuchungen in einer kontrollierten Umgebung begrenzt. Daher erscheint ein Experiment als Studiendesign sinnvoll, da es ermöglicht, kausale Zusammen-

hänge zwischen Methodenanwendung und Auswirkungen auf die Konstruktion herzustellen. In der Tat zielen die meisten (7/8) der identifizierten Experimente auf die Validierung der Wirkung ab. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass nur sieben der 27 Studien, die sich mit Validierung der Wirkung befassen, Experimente sind. Auf diesen Aspekt wird in Kapitel 5.2.2 näher eingegangen, da er mit den Zielen der untersuchten Konstruktionsmethode zusammenhängt. In der Validierung der Leistung wurde nur ein einziges Experiment (im Labor) identifiziert.

Aus diesen Ergebnissen kann in Bezug auf die Evidenzstufen geschlossen werden, dass die nicht vergleichenden Studien aus den Evidenzstufen V (24) und IV (14) gegenüber den analytischen Studien in den Evidenzstufen II (8) und III (8) überwiegen. Es ist außerdem auffallend, dass keine Studien identifiziert werden konnten, die die Stufe der Meta-Analyse erreichen. Für eine Meta-Analyse sind mehrere Experimente erforderlich, die dieselben beobachtbaren Variablen verwenden und dieselben Konstruktionsmethoden validieren. Es gibt jedoch nur acht Experimente in der Stichprobe, die möglicherweise in einer Studie zur Meta-Analyse hätten analysiert werden können. Darüber hinaus untersuchen nicht alle dieser Studien die gleichen Konstruktionsmethoden. Das Fehlen von Meta-Analysen bei der Validierung von Konstruktionsmethoden deckt sich mit den Erkenntnissen von P. J. Cash (2018), der feststellt, dass Meta-Analysen in der Konstruktionsforschung stark unterrepräsentiert sind. Die hier vorgestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass dieser Mangel an Meta-Analysen auch für die Validierung von Konstruktionsmethoden gilt. Standards für Forschungsmethoden sind notwendig, um eine Meta-Analyse zu ermöglichen (P. J. Cash, 2018; Glass, 1976). Das Fehlen von Meta-Analysen deutet daher auf einen Mangel an Standardisierung in diesem Bereich hin.

5.2.1.3 Zwischenfazit zu Teilforschungsfrage 1.1:

Die aus dem Überblick durch Kategorisierung gewonnenen Erkenntnisse adressieren Forschungsteilfrage 1.1: *„Wie vergleichbar sind aktuelle Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden?“* Der Überblick in Form einer Kategorisierung zeigt eine Vielzahl unterschiedlicher Studien, die alle Validierungsschritte und Evidenzstufen mit Ausnahme von Meta-Analysen abdecken. Es überwiegen jedoch die Studien, die sich auf die frühen Phasen der Methodenvalidierung in der Strukturvalidierung und Validierung der Wirkung konzentrieren. Bei der Strukturvalidierung deuten die Ergebnisse darauf hin, dass Expertenmeinungen und illustrative Fallbeispiele bei der Validierung gängige Praxis sind. Die Validierung der Wirkung hingegen zeigt eine breite Verteilung verschiedener Studiendesigns, die zur Validierung eingesetzt werden. Auch in der Validierung der Leistung werden unterschiedliche Studiendesigns eingesetzt. Damit lässt sich folgern, dass es sich in beiden Fällen um Schritte in der Validierung von Konstruktionsmethoden mit einer geringen Vergleichbarkeit in Bezug auf das Studiendesign handelt.

Die Validierung zur *Struktur* zeigt eine hohe Vergleichbarkeit der Studien in Bezug auf das Studiendesign, da fast ausschließlich illustrative Fallbeispiele verwendet werden. In der *Validierung der Wirkung* und *der Leistung* sind aktuelle Validierungsstudien in Bezug auf das Studiendesign nur wenig vergleichbar.

Die zugrundeliegenden Herausforderungen in Bezug zur Vergleichbarkeit und Strategien zu deren Überwindung werden im Folgenden durch eine vertiefte Analyse der identifizierten Studien herausgearbeitet.

5.2.2 Herausforderungen und Strategien zu deren Überwindung

Die identifizierten Studien wurden analysiert, um die Vergleichbarkeit im Hinblick auf Vorgehensweisen und Inhalt der Untersuchung zu finden. Es folgte eine Analyse von Studien innerhalb desselben Validierungsschritts, um Herausforderungen in verschiedenen Phasen der Validierung zu identifizieren.

In Bezug auf die Zielsetzung zeigte sich, dass die Validierung von Konstruktionsmethoden, die sich auf die Ideenfindung konzentrieren, die größte Gruppe bilden. Sie umfasst 15 Studien, die alle Evidenzstufen abgesehen von der Meta-Analyse abdecken. Bei allen acht identifizierten experimentellen Studien handelt es sich zudem um Untersuchungen von Methoden zur Ideenfindung. Zwei weitere Studien befassen sich mit Untersuchungen zur Persona-Methode (Beschreibung zur Methode in Kapitel 5.2.2.1). Vier weitere Studien konnten unterschiedlichen Konstruktionsmethoden für die Modularisierung und Entwicklung von Produktfamilien zugeordnet werden. In den verbleibenden 33 Studien konnten in Bezug auf die Zielsetzung der untersuchten Konstruktionsmethoden keine weiteren Gruppen vergleichbarer Studien identifiziert werden.

Methoden zur Ideenfindung bilden ein gutes Beispiel, wie eine hohe Vergleichbarkeit von Studien erreicht werden kann. Ideenfindungsmethoden verfolgen das einheitliche Ziel, die Kreativität zu fördern. Kreativität ist dabei als latentes Konstrukt zu sehen. Im Bereich der Forschung zur Kreativität wurden verschiedene latente Variablen vorgeschlagen, die zur Beschreibung von Kreativität genutzt werden können. Die am häufigsten genutzte Beschreibung ist hierbei die von Shah et al. (2003), die *Quantität*, *Qualität*, *Neuartigkeit* und *Vielfältigkeit* (engl. Quantity, Quality, Novelty und Variety) der generierten Ideen als latente Variablen für das Konstrukt *Kreativität* definieren. Die Nutzung von einheitlichen latenten Variablen führt zu einer sehr ähnlichen Operationalisierung der Methodenziele in beobachtbare Variablen in allen 15 identifizierten Studien, die Ideenfindungsmethoden validieren.

Zur Veranschaulichung wird die Operationalisierung der *Quantität* und *Neuartigkeit* von Ideen basierend auf Shah et al. (2003) hier kurz vorgestellt (siehe Abbildung 5.2). Die *Quantität* wird in der Ideenfindung als Teil des latenten Konstrukts *Kreativität* gesehen. Dabei ist die *Quantität* gleichzeitig eine direkt beobachtbare Variable, die durch das Zählen von dokumentierten Ideen erhoben wird. Die *Neuartigkeit* einer Idee wird auf Ebene der beobachtbaren Variable separat für jede durch die Idee zu erfüllende Teilfunktion durch eine Expertenbewertung erhoben. Die resultierenden Werte werden nach ihrer Bedeutsamkeit gewichtet und so ein gewichteter Mittelwert als Neuartigkeits-Kennwert der Idee über alle Teilfunktionen hinweg für die Ebene der latenten Variable berechnet.

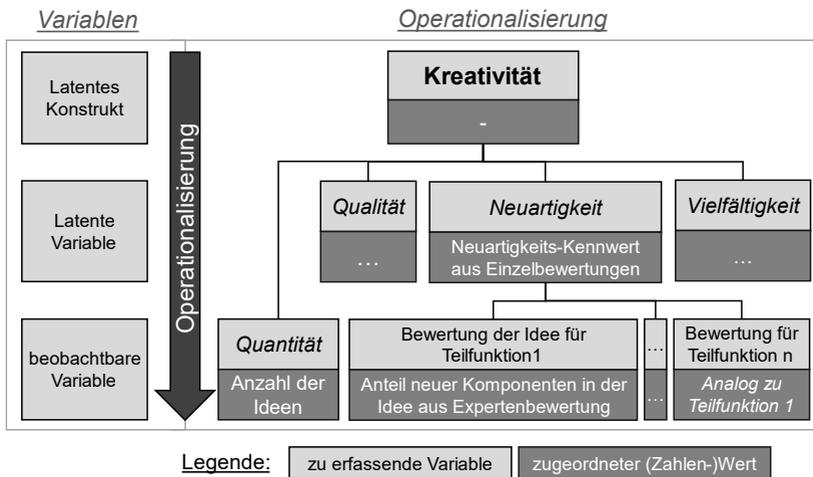


Abbildung 5.2: Darstellung der Operationalisierung von *Quantität* und *Neuartigkeit* als Anteile der *Kreativität* von Ideen zu technischen Lösungen. Über die Anzahl der entwickelten Ideen ist die *Quantität* eine direkt beobachtbare Variable und gleichzeitig ein Hauptbestandteil der *Kreativität*. Die *Neuartigkeit* einer Idee wird über die neuen Anteile von Komponenten zur Erfüllung von Teilfunktionen beschrieben, die durch eine Experteneinschätzung erhoben werden. Die Operationalisierung basiert auf Beschreibungen zu beobachtbaren Variablen für die Erhebung von Aspekten der Kreativität in Shah et al. (2003).

Die Forschung zu Ideenfindungsmethoden zeigt in Bezug auf verwendete latente und beobachtbare Variablen bereit ein hohes Maß an inhaltlicher Vergleichbarkeit. Gleichzeitig ist die Zielsetzung der Konstruktionsmethoden in diesem Bereich einheitlich, die Kreativität von Ideen zu fördern. Ein Blick auf die übrigen identifizierten Validierungsstudien zeigt jedoch eine Vielzahl unterschiedlicher Zielsetzungen für die untersuchten Konstruktionsmethoden, die eine Unterscheidung von Methodenklassen erschweren. Deshalb dienen im Folgenden die 15 Studien zur Validierung von Ideenfindungsmethoden als Ausgangspunkt für die Identifizierung geeigneter Strategien. Dazu werden sie mit Beispielen der 39 Studien zur Validierung anderer Konstruktionsmethoden verglichen. Auf diese Weise konnten drei grundlegende Herausforderungen und vier Strategien zu deren Überwindung identifiziert werden. Im Folgenden werden die Herausforderungen und Strategien zugeordnet zu den Validierungsschritten vorgestellt. Kapitel 5.2.2.1 beschreibt eine Herausforderung und diskutiert zwei mögliche Strategien für die Validierung der Wirkung. Kapitel 5.2.2.2 stellt zwei weitere Herausforderungen und eine Strategie zur Validierung der Leistung vor. Kapitel 5.2.2.3 befasst sich mit der vierten Strategie, die übergeordnet für alle Schritte der Validierung von Konstruktionsmethoden eingesetzt werden kann.

5.2.2.1 Herausforderungen & Strategien in der Validierung der Wirkung

Herausforderung 1: Fehlende Vergleichbarkeit der Operationalisierung

Abgesehen von mehreren Methoden zur Ideenfindung wurde nur die Persona-Methode mehr als einmal von verschiedenen Forschenden untersucht, allerdings mit unterschiedlichen Untersuchungsschwerpunkten. Die Persona-Methode zielt darauf ab, eine fiktive Figur - die Persona - zu schaffen, die eine ganze Kategorie zukünftiger Kunden repräsentiert, indem ihr eine Reihe typischer Eigenschaften zugewiesen wird (Brangier & Bornet, 2011). Die Methode wird eingesetzt, um die nutzerzentrierte Produktgestaltung zu fördern, indem die für zukünftige Kunden relevanten Eigenschaften zusammengefasst werden. Miaskiewicz und Kozar (2011) untersuchen den möglichen Nutzen dieser Methode, während Turner und Turner (2011) sich auf die Abschwächung möglicher negativer Auswirkungen der Methode in der Produktentwicklung konzentrieren. Darüber hinaus führen beide Studien eine Bewertung der Methode durch, ohne sie tatsächlich anzuwenden, und definieren daher keine beobachtbaren Variablen.

Bei der Suche nach weiteren Klassen von Konstruktionsmethoden wurden vier Studien identifiziert, die sich mit der Modularisierung von Produkten und der Entwicklung von Produktfamilien befassen. Die in diesen Beiträgen vorgestellten Konstruktionsmethoden verfolgen unterschiedliche Ziele in Bezug auf die Entwicklung von Produktfamilien und erheben daher unterschiedliche beobachtbare Variablen.

Baylis et al. (2018) zielen darauf ab, einen Kompromiss zwischen *Gemeinsamkeiten der Produkte* innerhalb einer Familie und der *Modularität* der Produktarchitektur zu finden. Pakkanen et al. (2016) bewerten ihre Konstruktionsmethode anhand der *Kosten* für ein Produkt innerhalb der Produktfamilie. S. Jung und Simpson (2016) entwickeln eigene beobachtbare Variablen zur Messung der *Modularität* und *Sparbarkeit*, um die Konnektivität in der Plattformarchitektur zu untersuchen. Koh et al. (2015) bauen auf einer beobachtbaren Variable auf, die Teil einer in früheren Arbeiten entwickelten Konstruktionsmethode ist, um die Priorisierung der Modularisierung von einzelnen Komponenten zu unterstützen. Obwohl sie unterschiedliche beobachtbare Variablen definieren, versuchen alle vier Beiträge, Merkmale modularer Produktstrukturen zu quantifizieren. Der Bereich der modularen Produktfamilien hat eine große Anzahl solcher beobachtbarer Variablen entwickelt. Mehrere Autoren haben die Erfolgsfaktoren in diesem Bereich bereits analysiert, um ihre Vielfalt zu reduzieren und ein übergreifendes Verständnis der relevanten Konzepte zu schaffen (Gershenson et al., 2003; Hackl et al., 2020; Salvador, 2007). Angesichts der großen Vielfalt an Variablen kann man jedoch davon ausgehen, dass die Diskussion zu einheitlichen Variablen in diesem Bereich noch nicht abgeschlossen ist.

In Bezug auf die Vergleichbarkeit zeigt die Analyse aktueller Studien, dass die meisten Entwickler von Konstruktionsmethoden neue Ziele für ihre eigenen Methoden festlegen und daher eine eigene Operationalisierung entwickeln, was zu einer Vielzahl von beobachtbaren Variablen führt. Dies macht es sehr schwierig, Studien zu Konstruktionsmethoden miteinander zu vergleichen. Der Aufwand für die Operationalisierung nimmt bei höheren Evidenzstufen erheblich zu, so dass es für Forschende schwierig ist, diese ohne einen gemeinsamen Standard zu erreichen. Die Konstruktion beinhaltet verschiedene Teilbereiche, die durch verschiedene Klassen von Konstruktionsmethoden angesprochen werden können. Eine Vereinheitlichung der Zielsetzung für alle Konstruktionsmethoden scheint daher nicht zielführend. Allerdings sollte der potentielle Mehrwert, der durch eine Vereinheitlichung der Zielsetzungen von Konstruktionsmethoden entstehen kann, in jedem einzelnen Teilbereich diskutiert werden. Die Notwendigkeit einer höheren Vergleichbarkeit wird auch durch den Beitrag von P. J. Cash (2018, S. 108) unterstützt, der Forschende dazu ermutigt, "sicherzustellen, dass die verwendeten Messgrößen und Methoden, wo immer möglich, Standardelemente enthalten, um die Meta-Analyse zu erleichtern".

Im Folgenden werden zwei Strategien zur Überwindung von Herausforderungen in der Methodenvvalidierung bezüglich Methodenzielen und deren Operationalisierung aus den identifizierten Beiträgen abgeleitet und diskutiert.

Strategie A: Einheitliche Ziele und Variablen anstreben

Acht der Studien zur Validierung von Ideenfindungsmethoden stützen sich explizit auf die vier von Shah et al. (2003) vorgeschlagenen Variablen *Quantität*, *Qualität*, *Neuartigkeit* und *Vielfältigkeit* der generierten Ideen. Die übrigen Studien stützen sich bei der Operationalisierung auf andere Arbeiten, erfassen aber ebenfalls mindestens eine der vier Variablen. Darüber hinaus zeigen andere Variablen wie die *Ideenqualität* (Wierenga & van Bruggen, 1998), die sich aus *Originalität* und *Ange messenheit* zusammensetzt (Masseti, 1996), oder die *Nicht-Offensichtlichkeit* (engl. *unobviousness*) (Howard et al., 2006), wie sie von Howard et al. (2011) verwendet wird, eine starke Verbindung zu den Variablen aus Shah et al. (2003). Diese Ähnlichkeit in der Operationalisierung einheitlicher Methodenziele ermöglicht einen Vergleich der Ergebnisse von verschiedenen Forschenden und verschiedener Ideenfindungsmethoden. Außerdem ermöglicht dies kritische Vergleiche, wie Chulvi et al. (2012) in ihrer Untersuchung zu verschiedenen Arten von Ideenfindungsmethoden zeigen, um die Anwendbarkeit von verschiedenen beobachtbaren Variablen zu diskutieren. Die Verwendung einheitlicher beobachtbarer Variablen fördert auch die Diskussion in Bezug auf zugrundeliegende Theorie, wie die aktuellen Überlegungen zur Variable *Neuartigkeit* (Fiorineschi et al., 2020) zeigen. Zudem ermöglicht es den Forschenden, neue Ansätze zu entwickeln, um die Ergebnisse der Ideenfindung auf einer detaillierteren Ebene zu analysieren, wie beispielsweise in Hay et al. (2020).

Kurzfassung Strategie A: „Einheitliche Ziele und Variablen anstreben“

In dieser Strategie geht es darum, wenige latente Konstrukte und Variablen zu identifizieren, die für einen Teilbereich der Konstruktion besonders relevant sind. Die Ziele von Konstruktionsmethoden für diesen Teilbereich sollten auf die Beeinflussung dieser wenigen latenten Variablen ausgerichtet sein. Auf diese Weise können besser vergleichbare Operationalisierungen für die Wirkungen von Konstruktionsmethoden und damit für Validierungsstudien entwickelt werden.

Das Beispiel der Ideenfindungsmethoden zeigt, dass die Definition einheitlicher Ziele und Variablen für eine Klasse von Konstruktionsmethoden zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse und damit zur Weiterentwicklung – sowohl der Konstruktionsmethoden selbst als auch der Variablen – führt. Dies ermöglicht es Forschenden, höhere Evidenzstufen zu erreichen. Dadurch entsteht eine Grundlage für die Anwendung von Meta-Analysen, die es ermöglichen, belastbare Erkenntnisse zu gewinnen. Die vorgestellten Beispiele deuten darauf hin, dass sich die künftige Forschung im Bereich der Validierung der Wirkung darauf konzentrieren sollte, einheitliche Ziele und beobachtbare Variablen für Klassen von Konstruktionsmethoden zu entwickeln, wo

dies angemessen ist. Dies könnte den Austausch zwischen Forschenden intensivieren und die Diskussion der Ergebnisse auf einer gemeinsamen Grundlage fördern. Eine solche Diskussion bildet die Basis für eine Standardisierung in dem jeweiligen Forschungsbereich.

Diskussion zu Strategie A

Die vorgestellte Strategie stützt sich auf erfolgreiche Vorgehensweisen in der Validierung der Wirksamkeit von Ideenfindungsmethoden in der Konstruktion. Die Ideenfindung bezieht sich jedoch auf eine frühe Phase des Konstruktionsprozesses. Sie könnte daher davon profitieren, dass sie im Vergleich zu späteren Phasen in der Konstruktion weniger Einflussfaktoren – wie beispielsweise Restriktionen durch das gewählte Fertigungsverfahren – berücksichtigen muss. Dieser Sachverhalt könnte eine höhere Vergleichbarkeit in der Ideenfindung fördern. In der Tat konzentriert sich die Mehrheit der Methoden in den 27 identifizierten Studien zur Validierung der Wirkung auf die Ideenfindung (15) oder auf die Konzeptphase (7). Deshalb stellt sich die Frage, ob die durch eine Konstruktionsmethode adressierte Phase der Konstruktion ein Grund für eine begrenzte Vergleichbarkeit von Studien sein könnte.

Die fünf verbleibenden Studien zur Validierung der Wirkung in der Stichprobe können in dieser Hinsicht weitere Erkenntnisse liefern. Zwei dieser Studien befassen sich mit der Modularisierung. Wie bereits beschrieben, befindet sich die Modularisierung als Forschungsbereich in der Konstruktion im Prozess des Aufbaus gemeinsamer Ziele und Variablen, obwohl sie eine spätere Phase im Konstruktionsprozess betrifft. Ein weiteres Beispiel in der Stichprobe ist die Validierungsstudie von Moultrie und Maier (2014), die eine Methode für montagegerechte Konstruktion einführt, die auf die Detailkonstruktion abzielt. Moultrie und Maier (2014) beziehen sich auf gängige Standards und Konzepte im Bereich der montagegerechten Konstruktion, um Ziele und beobachtbare Variablen für ihre Methode zu definieren. Beide Beispiele zeigen, dass es möglich ist, gemeinsame Ziele und beobachtbare Variablen für Methoden festzulegen, die auf verschiedene Phasen des Konstruktionsprozesses ausgerichtet sind.

Die Validierung der Wirkung befasst sich mit einer definierten und kontrollierten Situation, um direkte Auswirkungen von Konstruktionsmethoden zu untersuchen. Dies ist insbesondere bei Konstruktionsmethoden schwierig, die mehrere Phasen des Konstruktionsprozesses oder den Prozess im Ganzen betreffen. Zwei solcher Methoden werden in den verbleibenden zwei Studien zur Validierung der Wirkung in der Stichprobe beschrieben. Ćatić und Malmqvist (2013) präsentieren und evaluieren eine Methode, die sich mit dem Wissensmanagement über den gesamten Konstruktionsprozess beschäftigt. Daher untersuchen sie einen einzelnen Fall innerhalb

eines Unternehmens, um die Auswirkungen ihrer Methode über den gesamten Prozess hinweg zu erfassen. Obwohl dieser Prozess und die auftretenden Effekte einzigartig sind, definieren die Autoren dennoch Ziele, die verwendet werden können, um die Auswirkungen ihrer Methode in einzelnen Phasen der Konstruktion zu untersuchen. Ein weiteres Beispiel für die Validierung von Konstruktionsmethoden, die mehrere Phasen umfassen, stellt der Beitrag von Ahmad et al. (2013) dar. Sie führen ein Laborexperiment zu ihrer Methode für das technische Änderungsmanagement durch, indem sie den Konstruktionsprozess in einem Laborkontext modellieren.

Die vorgestellten Beispiele aus den Bereichen Modularisierung, montagegerechter Konstruktion und Wissens- sowie Änderungsmanagement zeigen, dass es durchaus möglich ist, präzise Ziele für die Validierung von Konstruktionsmethoden zu definieren, die verschiedene oder sogar mehrere Phasen der Konstruktion betreffen. Allerdings kann diese Operationalisierung sehr aufwendig sein, wenn Einflüsse und Anforderungen aus späteren Phasen der Konstruktion, wie z.B. Einschränkungen durch den Fertigungsprozess, berücksichtigt werden sollen.

Strategie B: Verwendung bestehender Werkzeuge und Modelle zur Aufdeckung von Gemeinsamkeiten

Den identifizierten Studien zur Methodvalidierung, mit Ausnahme der Studien zu Ideenfindungsmethoden, fehlen einheitliche Ziele, wenn auch Gemeinsamkeiten zu erkennen sind. Vergleichbare Komponenten verschiedener Methoden können zur Diskussion der direkten Auswirkungen dieser Komponenten beitragen. Auf diese Weise lassen sich neben einheitlichen Zielen auch andere Gemeinsamkeiten zwischen Konstruktionsmethoden feststellen.

Vergleichbare Komponenten können etablierte Modelle und Werkzeuge wie die Design Structure Matrix (DSM) sein. Neun im Review identifizierte Studien beinhalteten die DSM, drei davon (Hamraz et al., 2014; Loureiro et al., 2020; Tilstra et al., 2012) als eine zentrale Komponente, die innerhalb der Studie weiterentwickelt wurde. Dies verdeutlicht, dass es gängige Komponenten gibt, auf die mehrere Konstruktionsmethoden aufbauen.

Werkzeuge und Modelle helfen dabei, das Wissen über das Produkt und den Konstruktionsprozess in einer abstrahierten und standardisierten Weise zu dokumentieren, wodurch dieses Wissen zwischen verschiedenen Konstruktionskontexten vergleichbar wird. Durch den Vergleich des dokumentierten Wissens zwischen mehreren Studien, die dieselben Werkzeuge oder Modelle verwenden, können Kriterien für eine erfolgreiche Gestaltung in Bezug auf dieses Wissen ermittelt werden.

Die verwendeten Werkzeuge und Modelle können dann entweder Teil von Methoden werden, die darauf abzielen, diese Kriterien zu erreichen, oder zu Forschungswerkzeugen zur Bewertung dieser Kriterien werden.

Ein Beispiel dafür, wie Werkzeuge zur Definition von Zielen genutzt werden können, lässt sich aus der Studie von Ćatić und Malmqvist (2013) ableiten. Die in dieser Studie untersuchte Konstruktionsmethode befasst sich mit der Erstellung von *Engineering Checklists* als Werkzeug für das Wissensmanagement während der Konstruktion. Durch die Anwendung ihrer Methode in einer Fallstudie veranschaulichen Ćatić und Malmqvist (2013), in welchen Phasen der Konstruktion ihre vorgeschlagene Methode von den Nutzern als nützlich angesehen wurde und warum. Durch die Verwendung von *Engineering Checklists* wurde das Wissen der Methodenanwender in vereinfachter Form dokumentiert. Dies ermöglichte die Identifikation der relevantesten Wissensbereiche für verschiedene Kontexte. Zukünftige Studien zum Wissensmanagement in der Konstruktion könnten diese Erkenntnisse nutzen, indem sie Wissen mit *Engineering Checklists* bewerten, um 1) vergleichbare Ergebnisse zu relevanten Wissensbereichen in der industriellen Anwendung zu erzielen oder 2) ihre eigenen Methoden zum Wissensmanagement mit der Konstruktionsmethode von Ćatić und Malmqvist (2013) zu vergleichen. Das bedeutet, dass das Werkzeug *Engineering Checklist* auch als Forschungswerkzeug für die Bewertung von relevantem Wissen verwendet werden könnte.

Kurzfassung Strategie B: „Verwendung bestehender Werkzeuge und Modelle zur Aufdeckung von Gemeinsamkeiten“

Innerhalb dieser Strategie sollen in der Vorgehensweise von Konstruktionsmethoden genutzte etablierte Modelle und Werkzeuge als Möglichkeit genutzt werden, die Konstruktionsmethoden über verschiedene Kontexte hinweg vergleichbar zu machen. Dabei können die Modelle und Werkzeuge sowohl als integraler Bestandteil der Konstruktionsmethode als auch zur Dokumentation der durch die Konstruktionsmethode erzielten Ergebnisse genutzt werden.

Diskussion zu Strategie B

Modelle und Werkzeuge werden in der Konstruktion häufig verwendet, was sie zu einem geeigneten Ausgangspunkt für die Suche nach Gemeinsamkeiten zwischen Konstruktionsmethoden macht. Allerdings beinhaltet jeder Einsatz eines Werkzeugs sowie jeder Modellbildungsprozess eine Abstraktion der ursprünglichen Informationen. Einerseits hilft diese Abstraktion, sich auf eine geringere Anzahl von Aspekten zu konzentrieren und damit die Komplexität zu reduzieren. Andererseits birgt sie das Risiko der übermäßigen Vereinfachung, was auch Ćatić und Malmqvist (2013) durch die Aufnahme des Feedbacks von Methodenanwendern feststellen. Darüber hinaus

könnte die Verwendung gängiger Modelle und Werkzeuge eine Einengung auf die mit ihnen zusammenhängenden Kriterien fördern, anstatt die relevanten Probleme zu erfassen. Diese Sorge wird auch von Eckert et al. (2003) geäußert, die die Gefahr sehen, dass zu spezifische Forschungsmethoden ausgewählt werden.

Allerdings lässt sich argumentieren, dass die aktuelle Forschung auf ihre Weise übermäßig spezifisch ist, da viele Forschende Ziele und Variablen speziell für ihre eigene Konstruktionsmethode definieren. Gängige Modelle und Werkzeuge könnten zumindest eine gemeinsame Grundlage für eine erste Diskussion zu beobachtbaren Variablen bilden, die für eine Gruppe von Konstruktionsmethoden geeignet sind, die diese Modelle und Werkzeuge einsetzen. Außerdem ist eine Reduktion der Komplexität notwendig, um die Untersuchung von einzelnen Aspekten zu ermöglichen, insbesondere in dem von vielen Einflüssen geprägten Feld der Konstruktionsforschung. Die resultierende Vereinfachung muss nach dem Nachweis ihrer Nutzbarkeit in einer kontrollierten Umgebung noch auf externe Validität in der industriellen Praxis überprüft werden.

5.2.2.2 Herausforderungen & Strategien in der Validierung der Leistung

In der untersuchten Stichprobe sind nur wenige Studien zur Validierung der Leistung im kontrollierten Laborumfeld enthalten. Doch selbst in der geringen Anzahl an Studien kommen viele unterschiedliche Studiendesigns zum Einsatz, was eine geringe Vergleichbarkeit auf Ebene des Studiendesigns bedeutet. Die geringe Anzahl von Studien innerhalb der betrachteten Stichprobe, die eine Validierung von Konstruktionsmethoden im Feld durchführen (siehe Tabelle 5.4), erschwert zudem eine Interpretation zugrundeliegender Herausforderungen.

Herausforderung 2: Der Übergang vom Labor zum Feld

Die Strukturvalidierung und Validierung der Wirkung sind notwendig für eine umfassende Methodenvalidierung und hilfreich, um neu entwickelte Konstruktionsmethoden mit der Forschungsgemeinschaft zu diskutieren. Allerdings sind diese Schritte allein nicht ausreichend, um die Auswirkungen der Methodenanwendung in der industriellen Praxis zu untersuchen. Für Forschende scheint es herausfordernd zu sein, nach der Einführung einer Methode den nächsten Schritt Richtung Feld zu gehen, was sich in einer geringen Anzahl an Studien im Feld äußert. Ein möglicher Grund liegt in der fehlenden Klarheit darüber, welche Kriterien erfüllt werden müssen, um zu einer Validierung im Feld überzugehen. Hier bietet sich ein weiterer Ansatzpunkt für eine Erhöhung der Vergleichbarkeit in der Validierung von Konstruktionsmethoden.

Herausforderung 3: Hoher Aufwand für Validierung der Leistung im Feld

In Anbetracht des Ziels von Konstruktionsmethoden, die Konstruktionspraxis zu unterstützen, ist es überraschend, dass nur fünf der identifizierten Studien die Auswirkungen der Konstruktionsmethoden auf den Erfolg in der Praxis untersuchen (siehe Tabelle 5.4). Dies könnte auf den hohen Aufwand für Studien in der Konstruktionspraxis zurückzuführen sein. Von den identifizierten Studien befasst sich nur eine Vergleichsstudie mit der Validierung der Leistung im Feld (Snelders et al., 2011). In dieser Studie werden jedoch die Ergebnisse durch ein und dieselbe Konstruktionsmethode in Hinblick auf unterschiedliche kulturelle Kontexte verglichen, anstatt die Anwendung der Methode mit einer nicht angeleiteten Konstruktion oder einem Benchmark zu vergleichen.

Eine Herausforderung bei der Validierung der Leistung ist zudem die objektive Erhebung der Auswirkungen der Methodenanwendung auf das Konstruktionsergebnis. Zusätzlich ist ein hoher Aufwand erforderlich, um Studien in der Praxis durchzuführen, in denen die Effektivität der Konstruktionsmethode erfasst werden soll. Die Kriterien für den Nutzen einer Konstruktionsmethode sind zudem oft unklar. Selbst bei etablierten Kriterien kann es sein, dass die zur Erhebung notwendigen Informationen in der Praxis nicht verfügbar sind. In einem realen Konstruktionsprozess sind Studien zum eindeutigen Nachweis der Auswirkungen der Methodenanwendung daher generell eine Herausforderung.

Bei der Ideenfindung sind die Anforderungen den Forschenden bekannt. Hier verwenden Forschende einheitliche Methodenziele und Variablen zur Validierung (siehe Kapitel 5.2.2.1). Dies sollte die Forschung in die Lage versetzen, den Nutzen in der Praxis gezielt zu bewerten. Die identifizierten Studien zu Ideenfindungsmethoden befassen sich jedoch in den meisten Fällen (13/15) mit der Strukturvalidierung oder Validierung der Wirksamkeit. Dies könnte auf einheitliche Ziele zurückzuführen sein, die mit direkten, unmittelbaren Auswirkungen der Methodenanwendung verbunden sind (wie z.B. die Anzahl der dokumentierten Ideen). Um eine umfassende Validierung von Konstruktionsmethoden zu ermöglichen, ist es notwendig, langfristige Ziele zu definieren, die mit Zielvorgaben aus der Konstruktionspraxis verbunden sind.

Strategie C: Modellierung der Praxis zur Validierung der Leistung im Labor

Eine mögliche Strategie, die Erhebung direkter Effekte mit Zielvorgaben aus der industriellen Praxis zu verbinden, zeigt die Untersuchung von Cardin et al. (2013), die die einzige als Experiment ausgeführte Validierung der Leistung in den untersuchten Beiträgen ist (siehe Tabelle 5.4). Das erreichen die Autoren, indem sie unter Einbezug unternehmensinterner Informationen Auswirkungen auf die Praxis für eine Studie im Labor durch mathematische Modellierung abbilden. Cardin et al. (2013)

verbinden dazu direkte Auswirkungen einer Ideenfindungsmethode auf die *Flexibilität* von Lösungen mit einer Bewertung der *Lifecycle-Performance* der erstellten Konzepte. Sie operationalisieren die Vorgaben der Praxis durch die auf Grundlage ihrer mathematischen Modellierung aus beobachtbaren Variablen berechenbare "anticipated Lifecycle Performance" und verbinden sie mit der beobachtbaren Variable "Flexibility", die direkt durch die generierten Ideen beeinflusst werden kann. Die entwickelten beobachtbaren Variablen können dann verwendet werden, um den Einfluss anderer Konstruktionsmethoden oder Hilfsmittel auf *Flexibilität* und *Lifecycle-Performance* zu untersuchen. Dies wird in mehreren Folgestudien von Cardin gezeigt (Cardin et al., 2017; Cardin, Neufville & Geltner, 2015; Cardin, Ranjbar-Bourani & Neufville, 2015; Hu & Cardin, 2015). Die Strategie beinhaltet eine mehrstufige Operationalisierung von Zielen, die direkte, unmittelbare Wirkungen (z.B. Anzahl der Ideen) über intermediäre (z.B. Flexibilität) bis hin zu Variablen für langfristige, ferne Ziele (z.B. Lifecycle-Performance) adressieren. Dies scheint eine Strategie zu sein, um einheitliche Ziele nicht nur für die Validierung der Wirkung, sondern auch für die Validierung der Leistung von Konstruktionsmethoden zu etablieren.

Kurzfassung Strategie C: „Modellierung der Praxis zur Validierung der Leistung im Labor“

Ziel dieser Strategie ist es, relevante Aspekte aus der Konstruktionspraxis für die Untersuchung in einem Laborkontext abzubilden. Der Zusammenhang zur Praxis kann über mathematische Modelle hergestellt werden, die die Auswirkungen der Konstruktionsmethode über den Laborkontext hinaus abbilden. Andere Möglichkeiten zur Modellierung können realitätsnahe Aufgabenstellungen und Restriktionen sein, die relevante Aspekte aus der Praxis für eine Untersuchung im Labor verfügbar machen.

Ansätze zur Festlegung solcher Ziele sind auch in den in Kapitel 5.2.2.1 vorgestellten Arbeiten zu Produktfamilien und Modularisierung erkennbar. Dies kann als ein Zwischenschritt auf dem Weg zur Validierung von Konstruktionsmethoden in der Praxis angesehen werden, da so Fragestellungen aus der Praxis mit den Validierungsaktivitäten im Labor verbunden werden.

5.2.2.3 Übergeordnete Strategie D: Nutzung von Potentialen der Theorie

Die identifizierten Forschungsaktivitäten zu Ideenfindungsmethoden sind stark miteinander verknüpft, was sich in gegenseitigen Zitationen von Forschungsgruppen auf diesem Gebiet zeigt. Außerdem werden etablierte Ideenfindungsmethoden mehrmals untersucht. Diese sind z.B. TRIZ (Chulvi et al., 2013; Fiorineschi et al., 2018), die 6-3-5-Methode (Pettersson & Lundberg, 2018; A. Wodehouse & Ion,

2012) und allen voran das Brainstorming, das in dreierlei Hinsicht als Ausgangspunkt für die Forschung genutzt wird: Erstens, um eine Reproduktion vorheriger Ergebnisse zu ermöglichen (Chulvi et al., 2012; Chulvi et al., 2013), zweitens, um als Benchmark verwendet zu werden (Cardin et al., 2013; Hatcher et al., 2018), und drittens als Ausgangspunkt für Weiterentwicklungen, indem beispielsweise neue Stimuli hinzugefügt werden (Howard et al., 2011; Keshwani et al., 2017; Vandevenne et al., 2016).

In der Forschung zu Ideenfindungsmethoden kann ein gemeinsamer Kenntnisstand für die Entwicklung und Validierung von Methoden genutzt werden. Insbesondere die Validierung anhand eines Benchmarks führt zu wertvollen Erkenntnissen und ermöglicht ein tieferes Verständnis der Beziehungen zwischen den Einzelkomponenten der Konstruktionsmethoden und deren Auswirkungen. Dies ermöglicht Erkenntnisse, die für die Entwicklung und Prüfung von Theorien genutzt werden können. Chulvi et al. (2013) vergleichen beispielsweise verschiedene Arten von Ideenfindungsmethoden, um Erkenntnisse über den Einfluss der grundlegenden Mechanismen der verschiedenen Methodentypen auf die Ideenfindung zu gewinnen, die sie in ihren nachfolgenden Arbeiten (Chulvi et al., 2017; Mulet et al., 2016) verwenden. Dadurch können sie Beiträge zur Theorie leisten, die einen Zusammenhang zwischen der Art der verwendeten Informationen und der resultierenden Kreativität herstellen. Aus diesen theoretischen Beiträgen können dann neue Ideenfindungsmethoden entwickelt werden, die wiederum validiert werden können.

Modelle in der Konstruktion können ebenfalls eine Verbindung zur Theorie und damit zu etablierten und bewährten Konzepten in der Konstruktionsforschung herstellen. Beispielsweise verbinden Hamraz et al. (2014) DSM mit Geros *Function-Behaviour-Structure* (FBS) Ontologie (Gero & Kannengiesser, 2014). He und Gu (2016) entwickeln ihre Methode unter Verwendung von FBS. Weisbrod und Kroll (2018) entwickeln ihre *Idea Configuration Evaluation* Methode, indem sie die Methodenschritte in den *Knowledge* und *Concept Spaces* der *C-K Design Theory* (Hatchuel & Weil, 2009) umsetzen. Durch diese Verbindung von Konstruktionsmethoden mit theoretischen Zusammenhängen bieten diese Zusammenhänge einen allgemein verständlichen Ausgangspunkt für die Diskussion der grundlegenden Mechanismen der Methoden und ihrer Auswirkungen auf die Konstruktion.

Durch die Verknüpfung von Forschungsaktivitäten und das Aufbauen auf bestehenden Ergebnissen hat die Validierung von Konstruktionsmethoden das Potential, Teil des von P. J. Cash (2018) vorgeschlagenen Zyklus zur Theoriebildung und -prüfung zu werden: Ungeprüfte sowie etablierte theoretische Zusammenhänge können die Basis für einzelne Komponenten in der Entwicklung von Konstruktionsmethoden bilden. Verwenden mehrere Konstruktionsmethoden dieselben Komponenten, werden

sie auf diese Weise auf der Detailebene miteinander vergleichbar. Dadurch werden in der Validierung zum einen bisher nicht empirisch untersuchte theoretische Zusammenhänge geprüft und zum anderen erhöhen bereits etablierte Zusammenhänge die Wahrscheinlichkeit, dass die Konstruktionsmethode so wirkt, wie vorgesehen. Die Verbindung zur Theorie schafft also eine weitere Möglichkeit, die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Konstruktionsmethoden zu erhöhen und bietet auf diese Weise Potential für eine Standardisierung.

Kurzfassung Strategie D: „Nutzung von Potentialen der Theorie“

Diese Strategie verfolgt das Ziel, in der Konstruktionsforschung genutzte Theorien mit Konstruktionsmethoden zu verbinden. Zum einen ermöglicht dies, auf bereits geprüften Zusammenhängen innerhalb der Theorien aufzubauen und zum anderen werden Konstruktionsmethoden in Bezug auf diese Zusammenhänge miteinander vergleichbar. Zudem können so in der Theorie etablierte Kriterien für eine vergleichbare Validierung genutzt werden.

Die Entwicklung von Konstruktionsmethoden kann bereits auf Zusammenhängen der Theorie aufgebaut basieren, wie Reich (2010) beschreibt.

5.2.2.4 Zwischenfazit zur Teilforschungsfrage 1.2

Durch das Review konnten Ergebnisse zu Teilforschungsfrage 1.2 „*Was sind Herausforderungen im Aufbau von vergleichbaren Studien und wie werden diese überwunden?*“ erarbeitet werden. Die Herausforderungen, die sich aus der fehlenden Vergleichbarkeit von Studien zur Untersuchung der Wirkung ergeben, können durch das Anstreben einheitlicher Ziele und Variablen (siehe Strategie A in Kapitel 5.2.2.1) für Klassen von Konstruktionsmethoden adressiert werden. Der Forschungsbereich der Ideenfindungsmethoden liefert ein Beispiel dafür, wie solche Ziele und Variablen durch eine starke Verbindung zur Theorie zur Kreativität (vgl. Strategie D in Kapitel 5.2.2.3) definiert werden können. Werkzeuge und Modelle, die in Konstruktionsmethoden implementiert sind, können eine gemeinsame Grundlage für die Formulierung solcher Ziele und die Entwicklung geeigneter Forschungsmethoden bilden (siehe Strategie B in Kapitel 5.2.2.1).

Auch eine umfassende Validierung, die mehrere Schritte von Strukturvalidierung bis hin zur Validierung der Leistung im Feld umfasst, stellt eine Herausforderung für die Forscher dar. Die ermittelten Strategien zur Bewältigung dieser Herausforderung nutzen unterschiedliche Perspektiven: Eine Strategie (siehe Strategie C in Kapitel 5.2.2.2) nutzt die Zielvorgaben der Konstruktionspraxis und operationalisiert sie bis hin zu beobachtbaren Variablen und Kriterien, um die Praxis ins Labor zu brin-

gen. Dies reduziert den Aufwand für die Validierung und hilft, verschiedene Konstruktionsmethoden zu vergleichen, die auf dieselben Anforderungen der Konstruktionspraxis abzielen. Für die Operationalisierung ist allerdings eine aufwändige Modellierung der Zusammenhänge mit der Konstruktionspraxis notwendig. Hier bietet sich das Potential, bereits modellierte Zusammenhänge zu nutzen und kritisch zu reflektieren. Dadurch kann auch für den Übergang vom Labor zum Feld an einer Erhöhung der inhaltlichen Vergleichbarkeit innerhalb eines Forschungsbereichs gearbeitet werden. Der zweite Ansatz (siehe Strategie D in Kapitel 5.2.2.3) nutzt etablierte Theorie als Ausgangspunkt. Entweder wird eine in der Entwicklung befindliche Konstruktionsmethode explizit mit theoretischen Zusammenhängen verknüpft oder es werden Kriterien aus der Theorie zur Validierung bereits entwickelter Methoden herangezogen. Dieser Ansatz erleichtert die Diskussion der Ergebnisse für alle Forschenden, die mit der entsprechenden Theorie vertraut sind. Dadurch kann ein Beitrag für die inhaltliche Vergleichbarkeit der Konstruktionsmethoden in Bezug zur gemeinsamen theoretischen Basis geleistet werden.

Daher ergeben sich folgende Kernergebnisse zu Teilforschungsfrage 1.2:

Die Herausforderung 1 der fehlenden Vergleichbarkeit in der Validierung der Wirkung kann durch zwei Strategien adressiert werden:

Strategie A: *Anstreben einheitlicher Methodenziele und Variablen*

Strategie B: *Verwendung bestehender Werkzeuge und Modelle zur Aufdeckung von Gemeinsamkeiten*

Die Methodenvalidierung in Feldstudien (Herausforderung 2) sowie der Übergang vom Labor zum Feld (Herausforderung 3) finden bisher nur vereinzelt statt, was eine Vergleichbarkeit von Validierungsstudien erschwert. Dies wird durch eine der identifizierten Strategien adressiert:

Strategie C: *Modellierung der Praxis zur Validierung der Leistung im Labor*

Zur übergeordneten Adressierung verschiedener Herausforderungen konnte eine Strategie identifiziert werden:

Strategie D: *Nutzung von Potentialen der Theorie*

5.2.3 Einschränkungen der ersten deskriptiven Studie

Die vorgestellten Ergebnisse unterliegen gewissen Einschränkungen. Durch die Beschränkung des Umfangs der Betrachtung auf eine Auswahl von Journals und bestimmte Schlüsselwörter wurde möglicherweise relevante Literatur, die andere Schlüsselwörter verwendet oder in anderen Journals veröffentlicht wurde, nicht berücksichtigt. Dies konnte durch die Auswahl hochrangiger Journals mit passendem Themengebiet abgemildert werden. Darüber hinaus wurde der verwendete Such-Term iterativ entwickelt, indem Beiträge aus den betrachteten Journals und verwendete Schlüsselwörter gesichtet wurden, um Synonyme und abweichende Beschreibungen von Validierungsaktivitäten zu berücksichtigen.

Außerdem stammen die identifizierten Strategien aus einer vergleichsweise geringen Anzahl von Beiträgen, die für das Reviews ausgewählt wurden. Dies verhindert eine umfassende Übersicht über mögliche Strategien und beinhaltet eine mögliche Verzerrung bei der Auswahl der Beiträge. Ziel dieses Kapitels ist es jedoch nicht, eine erschöpfende Liste verwendeter Strategien zu erstellen, sondern mögliche Wege aufzuzeigen, wie die aktuelle Forschungspraxis den Herausforderungen in Bezug auf Vergleichbarkeit begegnen kann, um diese in dem zu entwickelnden Referenzprozess zu implementieren.

5.3 Fazit zur ersten deskriptiven Studie

Die erste deskriptive Studie in Form eines zweistufigen Literaturreviews verfolgt das Ziel, die Forschungsfrage 1 dieser Arbeit *„Wie werden Konstruktionsmethoden aktuell im Hinblick auf Vergleichbarkeit von Studien validiert?“* zu beantworten. Die durch die Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse sollen im Folgenden reflektiert werden, um anschließend eine Antwort auf Forschungsfrage 1 abzuleiten.

Es scheint dabei eine gängige Praxis für Forschungsmethoden in der Strukturvalidierung zu bestehen, in der Expertenmeinungen oder illustrative Fallbeispiele eingesetzt werden. Allerdings fehlt es an Vergleichbarkeit in Bezug auf Forschungsmethoden für die weiteren Schritte. In Bezug auf die Untersuchungsinhalte zeigen bisher nur Studien im Bereich der Ideenfindungsmethoden eine hohe Vergleichbarkeit auf. Im Bereich der Entwicklung von Produktfamilien gibt es aktuelle Bestrebungen, eine höhere Vergleichbarkeit herbeizuführen, indem bestehende Variablen durch Reviews und Diskussionen konsolidiert werden. Es konnten Erkenntnisse zur Vergleichbarkeit von Studien im Hinblick auf den Validierungsschritt und das Studiendesign abgeleitet werden:

Die *Strukturvalidierung* zeigt eine hohe Vergleichbarkeit der Studien in Bezug auf das verwendete Studiendesign. In der *Validierung der Wirkung* sind Validierungsstudien in Bezug auf das Studiendesign nur wenig vergleichbar.

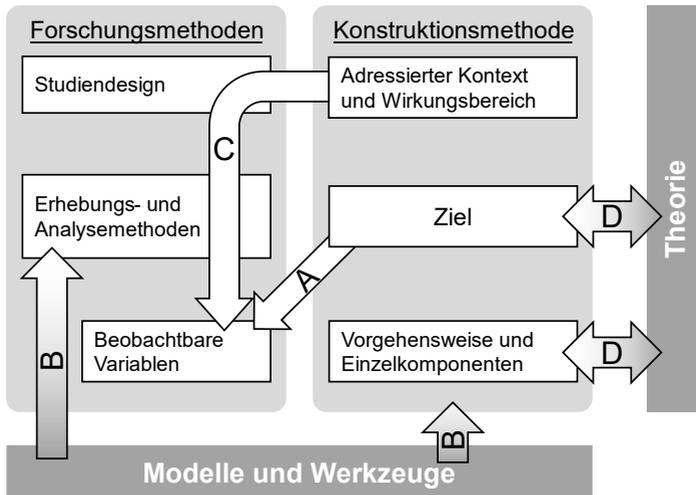
In der *Validierung der Leistung im Labor und Feld* dominieren beschreibende Studien. Eine Aussage zur Vergleichbarkeit wird jedoch durch die geringe Anzahl von Studien erschwert.

In Bezug zu den Untersuchungsinhalten zeigen bisher nur Studien zur Validierung von Ideenfindungsmethoden eine hohe Vergleichbarkeit auf.

Da die *Validierung der Wirkung* deutlich eine geringe Vergleichbarkeit von durchgeführten Studien aufweist, sollte dieser Schritt durch Maßnahmen für eine höhere Vergleichbarkeit unterstützt werden. Das macht diesen Schritt zu einem geeigneten Ansatzpunkt für einen Referenzprozess für Validierungsstudien. Der Fokus dieser Arbeit wird daher im Folgenden auf die *Validierung der Wirkung* gelegt.

Die im Review identifizierten Strategien zur Vergleichbarkeit lassen sich entweder der Konstruktionsmethode selbst oder anderen Ressourcen, wie der Theorie, sowie etablierten Modellen und Werkzeugen in der Konstruktion zuordnen. Die Strategien sprechen dabei unterschiedliche Aspekte zu Inhalten und Vorgehensweisen im Zusammenspiel zwischen Forschungsmethoden und Konstruktionsmethode an (siehe Abbildung 5.3).

Eine Vereinheitlichung der Ziele von Klassen von Konstruktionsmethoden sowie deren Operationalisierung in einheitliche beobachtbare Variablen (Strategie A) verursacht direkt eine inhaltliche Vergleichbarkeit von Studien. Zusätzlich entsteht eine Vergleichbarkeit der Vorgehensweise über den Zusammenhang zwischen angewandten Forschungsmethoden zur Datenerhebung und -analyse in Bezug auf die erhobenen Variablen. Ebenso können etablierte Modelle und Werkzeuge, wenn sie für die Entwicklung von Methoden zur Datenerhebung und -analyse genutzt werden (Strategie B), direkt zu einer Vergleichbarkeit beitragen. In der Nutzung von Potentialen der Theorie (Strategie D) werden die Vorgehensweise und Ziele der Konstruktionsmethode beeinflusst, um die Konstruktionsmethode selbst inhaltlich vergleichbarer zu machen. Strategie C *Modellierung von Zwischenzielen zur Validierung der Effektivität im Labor* kann zwar übergeordnet einen Beitrag leisten, bezieht sich jedoch eher auf eine nachfolgende Weiterentwicklung. Deshalb wird Strategie C für die Entwicklung eines Referenzprozesses für die Validierung der Wirksamkeit als zunächst ungeeignet eingestuft.



Legende: Strategien zur Erhöhung der Vergleichbarkeit von Studien

- A:** Anstreben einheitlicher Methodenziele und Variablen
- B:** Verwendung bestehender Werkzeuge und Modelle zur Aufdeckung von Gemeinsamkeiten
- C:** Modellierung der Praxis zur Validierung der Leistung im Labor
- D:** Nutzung von Potentialen der Theorie

Abbildung 5.3: Darstellung der Wirkungsbereiche von Strategien für eine höhere Vergleichbarkeit von Validierungsstudien. Dargestellt ist das Zusammenspiel von Bestandteilen der Konstruktionsmethode und Forschungsmethoden auf verschiedenen Ebenen. Die Darstellung nimmt Bezug auf Inhalte wie das *Ziel* der Konstruktionsmethode und zur Erhebung eingesetzte *beobachtbare Variablen*, sowie Vorgehensweisen wie *Erhebungs- und Analysemethoden*.

Im Hinblick auf Forschungsfrage 1 kann aus den Strategien folgendes Kernergebnis abgeleitet werden:

In aktuellen Validierungsstudien besteht in vielen Fällen eine geringe Vergleichbarkeit zu anderen Studien in Bezug auf Untersuchungsinhalte und Vorgehensweise.

In einzelnen Bereichen werden Strategien zur Erhöhung der Vergleichbarkeit in Bezug auf Untersuchungsinhalt und Vorgehensweise eingesetzt. Die Strategien beziehen sich sowohl auf die eingesetzten Forschungsmethoden als auch auf die Konstruktionsmethoden, die in diesen Studien untersucht werden.

6 Präskriptive Studie – Entwicklung eines Referenzprozesses

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung eines Referenzprozesses zur Methodenvalidierung. Für den Referenzprozess werden Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung und Elemente aus bestehenden Ansätzen zur Methodenvalidierung sowie Erkenntnisse aus Kapitel 5 miteinander kombiniert. Auf diese Weise wird Forschungsfrage 2 „*Wie können die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung und aus der Analyse der aktuellen Forschungspraxis zur Methodenvalidierung in einem Referenzprozess zur Unterstützung des Aufbaus von vergleichbaren Studien kombiniert werden?*“ beantwortet.

Der Referenzprozess wird vom Groben ins Detail hergeleitet: Von der Verortung im Prozess der Validierung von Konstruktionsmethoden über die Beschreibung eines Forschungsdesigns bis hin zur Beschreibung des Aufbaus einzelner Studien. Kapitel 6.1 legt dazu einen Anwendungsbereich für den Referenzprozess fest. Anschließend wird in Kapitel 6.2 der grundlegende Aufbau des Referenzprozesses hergeleitet, um das Forschungsdesign darzulegen. Hier werden geeignete Elemente aus bestehenden Ansätzen mit Erkenntnissen aus dieser Arbeit kombiniert. Kapitel 6.3 beschreibt den Aufbau und die Durchführung einzelner Studien in Form von Detailprozessen. Hier werden die erfolgreichen Strategien aus dem vorhergehenden Kapitel implementiert. Kapitel 6.4 zieht abschließend ein Fazit zu den potentiellen Beiträgen des Referenzprozesses zur Studienqualität und zur Unterstützung des Aufbaus von vergleichbaren Studien in der Validierung von Konstruktionsmethoden.

6.1 Festlegung des Anwendungsbereichs

In Kapitel 5 konnte der Schritt zur *Validierung der Wirkung* von Konstruktionsmethoden als ein geeigneter Ansatzpunkt für einen Referenzprozess identifiziert werden. Daraus wird folgende Eingrenzung abgeleitet:

Der Referenzprozess soll den Aufbau von Validierungsstudien zur <i>Wirkung</i> von Konstruktionsmethoden unterstützen.
--

Um den Rahmen des Referenzprozesses noch weiter zu konkretisieren, wird zusätzlich eine geeignete Klasse von Studiendesigns für die Validierung der Wirkung

anhand bestehender Erkenntnisse ausgewählt. In Kapitel 5.2.1 konnten durch den Überblick zur aktuellen Forschungspraxis Probandenexperimente als geeignete Klasse von Studiendesigns identifiziert werden. Dies wird gestützt durch Empfehlungen aus dem Stand der Forschung für diesen Validierungsschritt. Das *iDSDM* (Marxen, 2014) sieht Experimente für die Validierung der Wirkung vor. Im *Validation Square* (Pedersen et al., 2000) wird ebenfalls vorgeschlagen, Vergleichsstudien mit und ohne Anwendung der Konstruktionsmethode durchzuführen, um eine quantitative Aussage zur Wirkung ableiten zu können. Daalhuizen und Cash (2021) beschreiben zudem, dass eine Untersuchung der Wirkung unter kontrollierten Bedingungen stattfinden sollte. Folglich wird für Studien innerhalb des Referenzprozesses das Probandenexperiment als Grundlage für zu entwickelnde Studiendesigns festgelegt. Durch eine Vereinheitlichung des Studiendesigns auf Probandenexperimente kann zudem die Vergleichbarkeit der Vorgehensweise zur Untersuchung in diesem Schritt der Validierung erhöht werden.

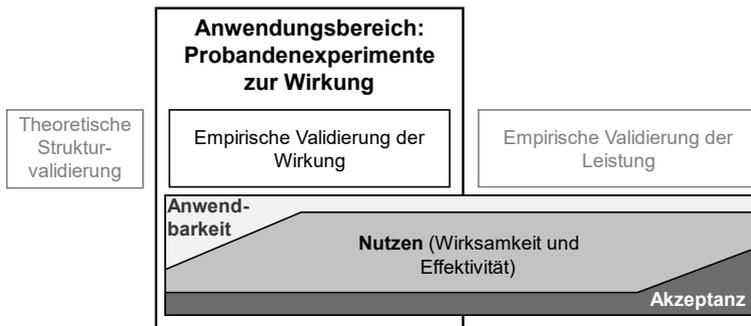


Abbildung 6.1: Anwendungsbereich für den Referenzprozess in den Schritten zur Validierung von Konstruktionsmethoden. Durch die Fokussierung auf die Wirkung sind Probandenexperimente als geeignetes Studiendesign zu sehen. Untersuchungen innerhalb des Prozesses sollten die Erfolgskriterien *Anwendbarkeit* und *Nutzen* (in Form von *Wirksamkeit*) berücksichtigen.

6.2 Synthese des übergeordneten Referenzprozesses

Wie im Fazit zum Stand der Forschung (Kapitel 2.5) und der Motivation (Kapitel 3.1) erörtert, stellen bestehende Ansätze zur Validierung von Konstruktionsmethoden keine Vorgehensweisen bereit, die eine vergleichbare Operationalisierung der Erfolgskriterien für den Aufbau von Validierungsstudien unterstützen. Der Referenzprozess soll die Validierung der Wirkung adressieren, die sich auf die Prüfung der Erfolgskriterien *Anwendbarkeit* und *Wirksamkeit* fokussiert. Der Überblick über die aktuelle Forschungspraxis in der Validierung von Konstruktionsmethoden (Kapitel 5.2) zeigt, dass durch etablierte Variablen und zugeordnete Erhebungsmethoden eine hohe Vergleichbarkeit von Studien zur Wirkung entstehen kann. Sind geeignete Variablen und Erhebungsmethoden zur Untersuchung der *Anwendbarkeit* und *Wirksamkeit* einer Konstruktionsmethode vorhanden, sollten diese auch genutzt werden. Kapitel 5.2 zeigt jedoch, dass es in vielen Fällen an solchen etablierten Variablen und Erhebungsmethoden fehlt. Ein Referenzprozess sollte für beide Situationen – mit und ohne etablierte zur Verfügung stehende Variablen und Erhebungsmethoden – ein geeignetes Vorgehen bereitstellen können.

Im Folgenden wird daher zuerst vom Idealzustand existierender etablierter Variablen und Erhebungsmethoden ausgegangen, für den in Kapitel 6.2.1 ein Soll-Prozess für die Validierung der Wirkung beschrieben wird. Kapitel 6.2.2 bezieht anschließend zusätzlich Iterationen mit ein, die durch eine notwendige Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode innerhalb der Validierung entstehen können. Kapitel 6.2.3 integriert die Entwicklung von vergleichbaren Operationalisierungen in das Forschungsdesign des Referenzprozesses. Auf diese Weise wird die aktuell häufige Situation fehlender etablierter Variablen und Erhebungsmethoden in den Referenzprozess integriert. In Kapitel 6.2.4 wird dann ein Zwischenfazit zum durch den Referenzprozess beschriebenen Forschungsdesign zur Validierung der Wirkung gezogen.

Dieses Kapitel basiert auf der Veröffentlichung „Guidance for design method validation: Operationalisation of efficacy“ (Eisenmann & Matthiesen, 2022). Kapitel 6.2.1 und Kapitel 6.2.2 (Abschnitte 1.2 und 1.3 im Original) sowie Kapitel 6.2.3 (Abschnitt 2.3 im Original) sind in Teilen aus der Originalveröffentlichung nach Übersetzung sinngemäß übernommen und Nummerierungen sowie Begrifflichkeiten auf diese Arbeit angepasst.

6.2.1 Soll-Prozess für die Validierung der Wirkung

Im Folgenden wird zunächst vom Optimalfall ausgegangen, um einen Soll-Prozess für die Validierung von Konstruktionsmethoden herzuleiten. Im Optimalfall sind etablierte Forschungsmethoden zur Untersuchung der Konstruktionsmethode vorhanden und die Wirksamkeit kann in der Validierung bestätigt werden. Ausgehend von der Eingrenzung möglicher Studiendesigns auf Probandenexperimente wird festgelegt, dass mindestens eine quantitative Studie zur Untersuchung der Wirksamkeit der Konstruktionsmethode notwendig ist.

6.2.1.1 Einbettung in die Schritte der Validierung

Die Kriterien zur theoretischen Validität innerhalb des *Validation Square* (siehe Kapitel 2.3.3.1) betreffen die Vor- und Nachbereitung der empirischen Validierung der Wirkung. Auf diese Weise kann ein Referenzprozess mit den Kriterien des *Validation Square* in die Schritte zur Validierung von Konstruktionsmethoden eingebettet werden (siehe Abbildung 6.2). Die Kriterien (1) und (2) des *Validation Square* adressieren dabei die erforderlichen Ergebnisse des ersten Validierungsschritts „Strukturvalidierung“, die vor Beginn einer empirischen Validierung vorliegen müssen. Deshalb können sie als Startbedingungen für den Referenzprozess angesehen werden. Zusätzlich sollte Kriterium (3) *Aufgabenstellungen* vor einer quantitativen Untersuchung geprüft werden, um die Angemessenheit der gewählten Aufgabenstellungen im Hinblick auf das Ziel der Konstruktionsmethode zu prüfen. Nach Durchführung des Referenzprozesses sollte die *Wirksamkeit* der Konstruktionsmethode geprüft sein, was durch Kriterium (4): *Nutzen* erfolgt. Durch Kriterium (5): *interne Validität* wird die Qualität der Untersuchung geprüft. Das Kriterium (6) *externe Validität* befasst sich mit dem Übertrag der Erkenntnisse aus dem kontrollierten Kontext auf die Anwendung in der Praxis. Damit ist das Kriterium gut geeignet, um nach der Validierung der Wirkung einen möglichen Kontext und eine Zielsetzung für die empirische Validierung der Leistung abzuleiten.

Die theoretische Validierung der Struktur einer Konstruktionsmethode sollte durch Reflexion der Konstruktionsmethode auf Grundlage von Forschungsergebnissen und etablierten Zusammenhängen aus der Theorie stattfinden. Dazu sollte auch klar definiert werden, welche unmittelbaren Wirkungen die Konstruktionsmethode verursachen soll. Dieser Einfluss wird in der *DRM* (Blessing & Chakrabarti, 2009) durch *Impact Models* visualisiert (vgl. Kapitel 2.3.1.1). *Impact Models* bilden eine explizite Darstellung der Wirkungen, die für die Wirksamkeit einer Konstruktionsmethode maßgeblich sind. In der empirischen Validierung der Wirkung werden diese Zusammenhänge geprüft.

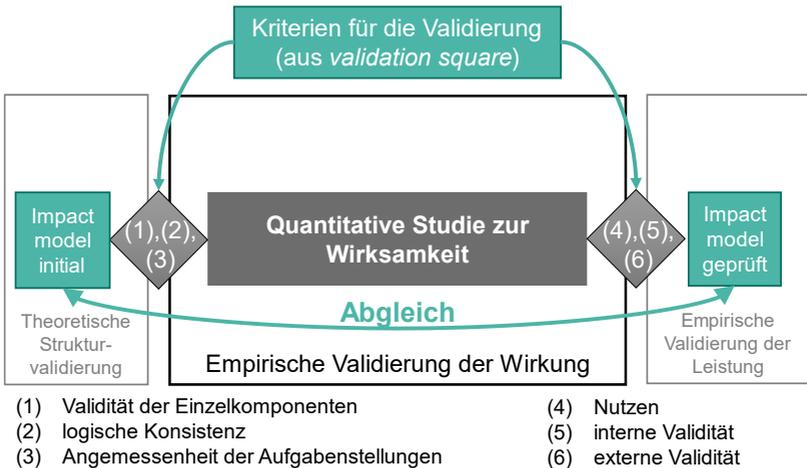


Abbildung 6.2: Einbettung der Validierung der Wirkung in die Schritte der Methodendvalidierung. Die im *Validation Square* beschriebenen Kriterien ermöglichen die Definition von Start- und Endbedingungen für den Prozess. Ein im Vorfeld zur empirischen Validierung erstelltes initiales *Impact Model* zu den erwarteten Wirkungen kann als Planungshilfe für die weitere Validierung dienen. Ein mit Erkenntnissen aus der Untersuchung der Wirksamkeit aktualisiertes, geprüftes *Impact Model* kann für eine Diskussion der externen Validität und für die Planung weiterer Validierungsschritte genutzt werden.

Zusätzlich zu den unmittelbaren Wirkungen werden in *Impact Models* die Auswirkungen auf übergeordnete Aspekte durch eine Verkettung von Einflussfaktoren dargestellt, die für eine Anwendung im realen Kontext relevant sind (vgl. Kapitel 2.3.1.1). Diese Auswirkungen sind Gegenstand der Validierungsstudien zur Leistung von Konstruktionsmethoden. Dadurch kann ein *Impact Model* genutzt werden, um nach der empirischen Validierung der Wirkung zu reflektieren, welche Auswirkungen in der Anwendung im realen Kontext zu erwarten sind. Auf diese Weise unterstützt ein *Impact Model* den Übergang zur empirischen Validierung der Leistung und ermöglicht eine Diskussion zur externen Validität.

Dadurch dass ein *Impact Model* die Zielsetzungen der gesamten nachfolgenden Validierung einer Konstruktionsmethode umfasst, ist es ein hilfreiches Werkzeug,

um die Schritte der Methodvalidierung im Voraus zu planen und Übergänge zwischen den Schritten zu ermöglichen (siehe Abbildung 6.2). Zusätzlich ermöglicht die explizite Darstellung in Form einer Visualisierung, dass Gemeinsamkeiten zwischen verschiedenen Konstruktionsmethoden leichter ersichtlich werden. *Impact Models* sind damit eine Möglichkeit, um die Einbettung des Referenzprozesses in den Gesamtprozess der Methodvalidierung umzusetzen.¹

6.2.1.2 Verständnis vor der Messung – „zuerst qualitativ, dann quantitativ“

Zur Untersuchung der Wirkung einer Konstruktionsmethode ist in der Methodvalidierung ein qualitatives Verständnis zur Anwendung der Konstruktionsmethode durch einen Nutzer notwendig. Konstruktionsmethoden haben eine Veränderung im Denken und Handeln der Anwendenden zum Ziel. Daher muss möglichst genau verstanden werden, wie die Konstruktionsmethode das Denken und Handeln im Detail beeinflusst. Dieses Verständnis ist außerdem die Grundlage für eine valide Operationalisierung der Wirksamkeit in Form von beobachtbaren Variablen.

Insbesondere um Einflüsse auf das Denken der Methodenanwender aufzudecken, sind qualitative Untersuchungen notwendig. Durch eine eingehende Beobachtung der Methodenanwender mit einer nachfolgenden Befragung und Reflexion der Durchführung können dazu Erkenntnisse gewonnen werden. Beobachtungen des Verhaltens können zwar in der Regel quantifiziert durchgeführt werden, die zugrundeliegenden Denkprozesse bleiben dabei aber unbeachtet. Zusätzlich bleiben bei einer nicht erfolgreichen Validierung in einer quantitativen Untersuchung die Ursachen unklar, wenn nicht zuvor ein qualitatives Verständnis der Auswirkungen durch die Methodenanwendung aufgebaut wurde. Die Validierung in Bezug auf die Wirkung einer Konstruktionsmethode sollte deshalb sowohl qualitativ als auch quantitativ stattfinden.

6.2.1.3 Wirksamkeit braucht Anwendung – „zuerst Anwendbarkeit dann Nutzen“

Damit eine Konstruktionsmethode ihre Wirkung auf die vorgesehene Weise erfüllen kann, muss sie korrekt angewandt werden. Wird sie nicht korrekt angewandt, kann eine Wirkung nicht zweifelsfrei der Anwendung der Methode zugeordnet werden. Diese eindeutige Zuordnung ist jedoch notwendig für die interne Validität der Untersuchung. Die *Anwendbarkeit* stellt eine notwendige Bedingung für die Untersuchung des *Nutzens* dar. Als Erfolgskriterium in der Validierung von Konstruktionsmethoden

¹ Zur Visualisierung der Zusammenhänge können alternative Ansätze wie zum Beispiel Pfad-Diagramme nach Baron und Kenny (1986), wie von Robinson (2016) im Übertrag auf die Konstruktionsforschung vorgeschlagen, genutzt werden.

(siehe Kapitel 2.4) sollte die *Anwendbarkeit* neben einer theoretischen Betrachtung auch empirisch untersucht werden. Durch eine Beobachtung der tatsächlichen Anwendung der Konstruktionsmethode kann innerhalb von empirischen Untersuchungen ein Verständnis dazu aufgebaut werden, wie die Konstruktionsmethode verstanden wird und wie ihr Nutzen durch die Anwendung entsteht. Eine qualitative Untersuchung der *Anwendbarkeit* scheint daher zielführend zu sein, um die Anwendung der Konstruktionsmethode sicherzustellen. Zusätzlich unterstützt eine solche Untersuchung, ein erstes Verständnis darüber zu generieren, wie die Konstruktionsmethode ihre Wirkungen erzielt.

Für Untersuchungen der *Wirksamkeit* sind zudem Untersuchungen notwendig, die eine Quantifizierung der Wirkungen einer Konstruktionsmethode ermöglichen. Folglich werden für das Forschungsvorgehen im Referenzprozess mindestens zwei Studien innerhalb der empirischen Validierung der Wirkung als notwendig erachtet (siehe Abbildung 6.3): Eine qualitative Studie mit Fokus auf die Untersuchung der *Anwendbarkeit* als Teil des *Nutzens*, sowie eine quantitative Studie mit Fokus auf der *Wirksamkeit* der Konstruktionsmethode. Auf diese Weise kann eine ausreichende Anwendbarkeit in der qualitativen Studie vor Durchführung der quantitativen Untersuchung sichergestellt werden. Die tatsächliche Anwendung der Konstruktionsmethode muss für eine Prüfung der internen Validität in der quantitativen Studie weiterhin geprüft werden.

Daraus ergibt sich als Soll-Prozess für die Validierungsstudien zur Wirksamkeit von Konstruktionsmethoden ein Stage-Gate-Prozess mit einem qualitativen und einem quantitativen Schritt (siehe Abbildung 6.3). In den Gates werden dabei jeweils die Kriterien des *Validation Square* geprüft. Zur Vorbereitung des Soll-Prozesses wird ein initiales *Impact Model* genutzt, das nach der Durchführung mit den gewonnenen Erkenntnissen aktualisiert wird zu einem geprüften *Impact Model*.

Die Elemente aus bestehenden Ansätzen (in grün) tragen gemeinsam mit der Teilung in qualitative und quantitative Untersuchung zur Studienqualität bei. Zur Erhöhung der Vergleichbarkeit der durch die Anwendung des Soll-Prozesses entstehenden Studien, werden die in der ersten deskriptiven Studie (Kapitel 5) identifizierten Strategien implementiert. Die Implementierung in einzelnen Detailprozessen für die qualitative und quantitative Studie wird in Kapitel 6.3 erläutert.

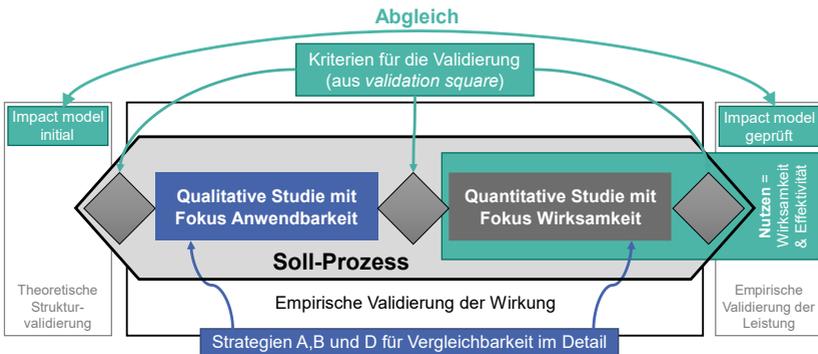


Abbildung 6.3: Soll-Prozess für die empirische Validierung der Wirkung von Konstruktionsmethoden bestehend aus einer qualitativen Studie mit Fokus auf Anwendbarkeit und einer quantitativen Studie mit Fokus auf Wirksamkeit. Die Anwendbarkeit als eine notwendige Bedingung für die Untersuchung der Wirksamkeit sollte zuerst untersucht werden. Eine qualitative Untersuchung ist notwendig, um Einflüsse auf die Anwendung einer Konstruktionsmethode zu verstehen, bevor Wirkungen quantifiziert werden. Grün dargestellt sind Elemente aus bestehenden Ansätzen, blau im Rahmen dieser Arbeit entstandene Beiträge.

6.2.2 Evolution der Konstruktionsmethode in der Validierung

Im Prozess der Methodenvvalidierung besteht in jedem Schritt die Möglichkeit, dass die Konstruktionsmethode die gestellten Anforderungen nicht erfüllt. In diesem Fall sollte die Konstruktionsmethode entsprechend den Validierungsergebnissen weiterentwickelt werden. Wie auch in der Entwicklung technischer Produkte kommt es dadurch im realen Prozess zu Iterationen. Durch eine empirische Validierung der Wirkung von Konstruktionsmethoden kann bereits in einem kontrollierten Umfeld eine Weiterentwicklung durch Iterationen stattfinden. Durch die Aufteilung der Validierung in zwei separate Studien kann die Konstruktionsmethode spezifisch in Bezug auf Anwendbarkeit – nach der qualitativen Studie – und in Bezug auf Wirksamkeit – nach der quantitativen Studie – weiterentwickelt werden (siehe Abbildung 6.4). Je nach Umfang der Weiterentwicklung muss entschieden werden, wie weit im Pro-

zess zurückgesprungen werden muss. Sind nach der quantitativen Studie weitreichende Weiterentwicklungen der Konstruktionsmethode nötig, sollte gegebenenfalls eine erneute qualitative Studie mit Fokus Anwendbarkeit oder sogar eine erneute Strukturvalidierung erfolgen.

Mit dem in Abbildung 6.4 dargestellten Prozess und der Festlegung auf Probandenexperimente sind in Bezug auf die Forschungsmethoden zum einen das Forschungsdesign als Abfolge der durchzuführenden Studien und zum anderen eine Klasse von Studiendesigns für die empirische Validierung der Wirksamkeit definiert. Mit der Nutzung der Kriterien aus dem *Validation Square* sind außerdem die Bedingungen für einen erfolgreichen Abschluss der einzelnen Schritte beschrieben.

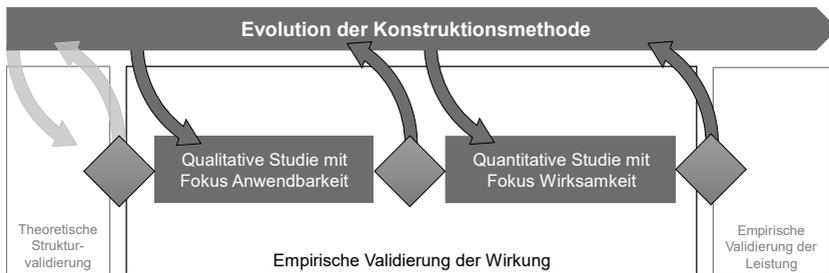


Abbildung 6.4: Implementierung der möglichen Iterationen zur Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode innerhalb der Validierung. Jedes Gate kann prinzipiell eine Iteration in der Entwicklung der Konstruktionsmethode und damit einen Rücksprung zu vorherigen Gates auslösen. Abbildung in Anlehnung an Eisenmann und Matthiesen (2022).

Allerdings kann der Referenzprozess in dieser Form nur genutzt werden, wenn die Ziele der zu untersuchenden Konstruktionsmethode klar operationalisiert und passende Forschungsmethoden zur Datenerhebung und -auswertung verfügbar sind. Bei der Neuentwicklung von Konstruktionsmethoden besteht die Möglichkeit, die Methodenziele direkt auf Variablen zu beziehen, die in etablierten theoretischen Zusammenhängen abgebildet sind. In Kapitel 5 konnte bereits illustriert werden, dass der Bezug auf einheitliche Variablen aus der Theorie zur Kreativität und zugeordnete Forschungsmethoden im Bereich der Ideenfindungsmethoden zu einer hohen Vergleichbarkeit der Studien beiträgt. Werden bestehende Variablen als Schlüssel-

faktoren für neu entwickelte Konstruktionsmethoden verwendet, können die Einflüsse der Konstruktionsmethode durch theoretische Zusammenhänge beschrieben werden.

Etablierte theoretische Zusammenhänge als Grundlage für Konstruktionsmethoden (siehe Strategie D in Kapitel 5.2.2.3) können auch aus anderen Fachbereichen stammen. So konnte beispielsweise in der Entwicklung einer Methode zur Unterstützung der Problemanalyse in der Konstruktion (Nelius et al., 2021) auf Erkenntnisse aus der Psychologie zurückgegriffen werden. Auf diese Weise konnte eine Konstruktionsmethode für das Ziel der Reduktion eines bekannten systematischen Denkfehlers entwickelt und validiert werden. Sowohl für die Entwicklung der Konstruktionsmethode als auch für die Validierung der Wirksamkeit in einem Probandenexperiment (Nelius & Matthesen, 2019) wurden die bereits bestehenden Erkenntnisse zu systematischen Denkfehlern genutzt. Zusätzlich erhöht ein solcher Bezug zu etablierten theoretischen Zusammenhängen die Belastbarkeit der Validierungsergebnisse.

6.2.3 Co-Evolution von Konstruktions- und Forschungsmethode

Für die Validierung bereits bestehender Konstruktionsmethoden besteht jedoch weiterhin das Problem, dass häufig keine etablierten Variablen und Erhebungsmethoden vorhanden sind, die eine vergleichbare Erhebung der Wirksamkeit ermöglichen (siehe Kapitel 5.2.2). Geeignete Erhebungsmethoden müssen also erst entwickelt und etabliert werden. Dabei ist nicht die Vorgehensweise an sich – wie beispielsweise die Erhebung durch ein Interview oder einen Fragebogen – der zu entwickelnde Anteil. Es fehlt vielmehr an etablierten latenten Konstrukten und Variablen – auf die Konstruktionsmethoden wirken sollen – und deren Operationalisierung in beobachtbare Variablen.

Sind keine etablierten latenten und zugehörigen beobachtbaren Variablen zur Erhebung der Wirksamkeit einer Konstruktionsmethode in Bezug auf ihre Zielsetzung vorhanden, müssen diese zu Beginn der Validierung durch eine geeignete Operationalisierung bereitgestellt werden. Neu entwickelte beobachtbare Variablen und die zugehörigen Erhebungsmethoden innerhalb des Studiendesigns sind als Forschungsmethoden jedoch genauso wie die Konstruktionsmethode zu diesem Zeitpunkt noch nicht validiert. Es ist daher nicht auszuschließen, dass auf diese Weise die Ergebnisse der Untersuchung ungewollt beeinflusst oder die definierten Variablen nicht korrekt erfasst werden. Das bedeutet, die Validierungsergebnisse müssen nicht nur im Hinblick auf Einflüsse durch die Anwendung der Konstruktionsmethode, sondern ebenfalls auf Einflüsse der angewandten Forschungsmethoden betrachtet

werden. Es besteht hier auch für die Forschungsmethoden die Möglichkeit, dass diese die Anforderungen nicht erfüllen. Für neu entwickelte Variablen und zugehörige Erhebungsmethoden kann also während des Prozesses der Validierung der Wirkung ebenfalls eine iterative Weiterentwicklung notwendig sein (siehe Abbildung 6.5).

Da die Erhebungsmethoden das Ziel haben, die Auswirkungen von Konstruktionsmethoden zu erfassen, beziehen sie sich direkt auf die Beeinflussung der Konstruierenden durch die Konstruktionsmethode. Insbesondere im Detail sind Erhebungsmethoden und Konstruktionsmethode daher eng miteinander verknüpft: Die Erreichung der Ziele einer Konstruktionsmethode wird mit Hilfe von Methoden zur Datenerhebung und passender beobachtbarer Variablen geprüft (vgl. Abbildung 5.3). Ergeben sich im Prozess der Validierung neue Erkenntnisse zur Wirkung der Konstruktionsmethode, muss gegebenenfalls die beobachtbare Variable und deshalb auch die Erhebungsmethode weiterentwickelt werden. Umgekehrt können durch die Erhebung bisher nicht bekannte Aspekte in Bezug auf die untersuchte Situation aufgedeckt werden. Sind diese Aspekte relevant für die zu untersuchende Konstruktionsmethode und den durch sie anvisierten Kontext, kann das in einer Weiterentwicklung der Konstruktionsmethode resultieren. Die neu entdeckten Aspekte sollten dabei bestehenden latenten Konstrukten und Variablen zugeordnet werden, die auch in der Praxis relevant sind. Auf diese Weise können die Erkenntnisse verschiedener Studien in übergeordneten Variablen abgebildet werden, die über den Kontext der Studie hinaus relevant für die Konstruktion sind. Dieses Vorgehen sollte allerdings nur angewandt werden, wenn keine bestehenden latenten Konstrukte oder Variablen für die Zielsetzung der Konstruktionsmethode identifiziert werden können. Es handelt sich vielmehr um einen pragmatischen Ansatz, der eine erste Untersuchung bisher nicht beschriebener Wirkungen ermöglichen soll.

Durch die gegenseitige Beeinflussung entsteht eine Co-Evolution von Konstruktions- und Forschungsmethode². Die Umsetzung dieser Co-Evolution im Referenzprozess ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Es sollte nach beiden Studien geprüft werden, ob die eingesetzten Erhebungsmethoden ihren Zweck für die Validierung der Konstruktionsmethode erfüllen können. Findet eine Co-Evolution von Konstruktions- und Forschungsmethode statt, kann eine Studie lediglich Anhaltspunkte zu deren Eignung ermöglichen. Sowohl die Konstruktionsmethode als auch die Erhebungsmethode sollten in separaten Studien geprüft werden. Erläuterungen zur Prüfung der Eignung der eingesetzten Erhebungsmethode sind in Kapitel 6.3 beschrieben.

² Die hier beschriebene Co-Evolution ist als Analogie zur Co-Evolution von Problem- und Lösungsraum in der Konstruktion nach Maher et al. (1996) zu sehen.

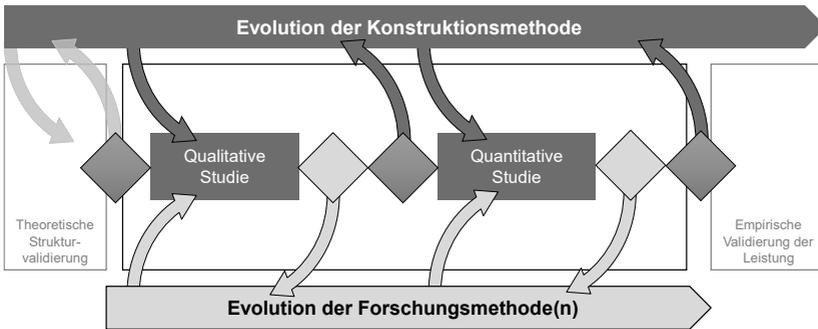


Abbildung 6.5: Darstellung des Validierungs-Navigators – ein Referenzprozess für Validierungsstudien zur Wirkung von Konstruktionsmethoden in Anlehnung an Eisenmann und Matthiesen (2022). Aufgrund fehlender Standards in Bezug auf Forschungsmethoden können neben Iterationen zur Konstruktionsmethode in jeder Überprüfung in den Gates auch Iterationen zu den angewandten Forschungsmethoden auftreten. Da sich Iterationen zur Konstruktions- und Forschungsmethode gegenseitig beeinflussen können, entsteht eine Co-Evolution. Sind bereits etablierte Forschungsmethoden vorhanden, entfällt die Evolution der Forschungsmethode. Wird die Konstruktionsmethode erfolgreich validiert, entfällt zudem die Evolution der Konstruktionsmethode. Auf diese Weise entsteht wieder der Soll-Prozess. Da der Referenzprozess diese verschiedenen Varianten je nach vorherrschender Situation erlaubt, kann er als Orientierung für Validierungsstudien gesehen werden. Daraus ergibt sich der Name **Validierungs-Navigator**.

6.2.4 Zwischenfazit zum Referenzprozess

Die durch den Validierungs-Navigator beschriebene Vorgehensweise gibt auf der Betrachtungsebene des Forschungsdesigns zur *Validierung der Wirkung* eine Struktur vor. Erstmals werden durch diesen Referenzprozess auch die Erhebungsmethoden, zugehörige Variablen und ihre Entwicklung explizit einbezogen.

Aus der hier vorgestellten neuartigen Betrachtungsweise der Co-Evolution von Konstruktions- und Forschungsmethode leiten sich Auswirkungen für die Standardisierung in der Methodenvvalidierung ab. Zum einen ist die Entwicklung von Erhebungsmethoden mit erheblichem Aufwand verbunden. Zum anderen besteht ein großes

Risiko, dass durch eine Neuentwicklung von Erhebungsmethoden speziell für die Validierung der eigenen Konstruktionsmethode die Vergleichbarkeit zu anderen Forschungsergebnissen nicht gewährleistet werden kann. Auf diese Weise entstehen eine Vielzahl an wenig vergleichbaren Untersuchungen zu ein und demselben Untersuchungsgegenstand wie Vasconcelos und Crilly (2016) illustrieren (siehe auch Kapitel 1). Daher sollte darauf geachtet werden, dass neu entwickelte oder weiterentwickelte Erhebungsmethoden und Variablen auch für die Untersuchung anderer Konstruktionsmethoden einsetzbar sind, wenn diese ähnliche Ziele verfolgen. Wird in Veröffentlichungen zur Validierung von Konstruktionsmethoden explizit die Übertragbarkeit der Erhebungsmethoden auf andere Konstruktionsmethoden diskutiert, kann bereits diese Sichtweise zu einer höheren Vergleichbarkeit von Studien beitragen. Werden neue Erhebungsmethoden und Variablen in separaten Veröffentlichungen eingeführt und ihr Einsatzbereich diskutiert, bevor sie zur Validierung von Konstruktionsmethoden eingesetzt werden, kann dies zu einer Konsolidierung beitragen.

6.3 Synthese der Detailprozesse für qualitative und quantitative Studien

Der in Kapitel 6.2 vorgestellte Referenzprozess gibt ein Forschungsdesign zur *Validierung der Wirkung* von Konstruktionsmethoden vor, in dem eine Abfolge von Studien und zu erfüllende Kriterien definiert werden. In diesem Kapitel wird der Referenzprozess genauer beschrieben, indem Detailprozesse für qualitative Studien mit Fokus auf *Anwendbarkeit* (Kapitel 6.3.1) und für quantitative Studien mit Fokus auf *Wirksamkeit* (6.3.2) vorgestellt werden. In diesem Kapitel werden außerdem die in Kapitel 5.3 identifizierten Strategien in den Referenzprozess implementiert, um eine höhere Vergleichbarkeit auf verschiedenen Ebenen zu erreichen.

Der Aufbau der Kapitel zur Beschreibung der Teilprozesse ist in Tabelle 6.1 zur Übersicht dargestellt. Das jeweils erste Teilkapitel befasst sich mit der Operationalisierung des zu untersuchenden Erfolgskriteriums, also zuerst der *Anwendbarkeit* und anschließend der *Wirksamkeit* (als Teil des *Nutzens*). Anschließend folgen Erläuterungen und Hinweise zur Umsetzung der Studien in Bezug auf Elemente des Studiendesigns. Abschließend wird jeweils erläutert, welche Aspekte bei der Entscheidung über die Eignung von Forschungs- und Konstruktionsmethode beachtet werden sollten.

Tabelle 6.1: Aufbau der Kapitel zur Beschreibung der Detailprozesse

	Studien mit Fokus Anwendbarkeit (Kapitel 6.3.1)	Studien mit Fokus Wirksamkeit (Kapitel 6.3.2)
Operationalisierung (Kapitel 6.3.x.1)	Methodenschritte und Teilergebnisse Hilfsmittel für die Dokumen- tation erstellen	Methodenziele und be- obachtbare Variablen Implementierung einer quan- titativen Erhebungsmethode
Studiendesign & -durchführung (Kapitel 6.3.x.2)	Studienteilnehmende Aufgabenstellung Einführung der Konstruktionsmethode Datenerhebung und -analyse	
Interpretation der Stu- dienergebnisse (Kapitel 6.3.x.3)	Entscheidungen zur Erhebungsmethode und zur Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode	Entscheidung zur Eignung der Erhebungsmethode für die Wirksamkeit Entscheidung zur Wirksamkeit der Konstruktionsmethode

6.3.1 Detailprozess für qualitative Studien mit Fokus Anwendbarkeit

Im Fokus der qualitativen Studie steht ein Verständnis dazu aufzubauen, wie die Bestandteile der Konstruktionsmethode ihre Anwendbarkeit in Bezug auf ausgewählte Aufgabenstellungen beeinflussen. So kann die Anwendbarkeit vor der nachfolgenden quantitativen Studie optimiert werden, was eine korrekte Anwendung der Konstruktionsmethode wahrscheinlicher macht. Im Hinblick auf die Forschungsmethoden soll die qualitative Studie zum einen Aufschluss darüber geben, ob die Aufgabenstellungen tatsächlich durch die Konstruktionsmethode adressiert werden kann (siehe Kriterium (3)). Zum anderen soll eine Erhebungsmethode genutzt werden oder entstehen, die eine Prüfung der korrekten Anwendung der Konstruktions-

methode in der quantitativen Studie ermöglicht. Zusätzlich kann durch eine qualitative Studie ein Verständnis dazu aufgebaut werden, wie die *Wirksamkeit* entsteht, indem Konstruierende bei der Anwendung der Konstruktionsmethode beobachtet werden. Auf diese Weise wird die nachfolgende quantitative Studie vorbereitet in deren Fokus die *Wirksamkeit* steht.

Untersuchungen, wie die in diesem Kapitel beschriebenen qualitativen Studien mit Fokus auf Anwendbarkeit, finden in der Regel im Rahmen von Pilot- und Vorstudien zur Vorbereitung umfangreicherer Untersuchungen statt. Die Ergebnisse solcher Studien werden aktuell kaum veröffentlicht und finden häufig lediglich Erwähnung in der Beschreibung der Vorgehensweise zu den nachfolgenden umfangreicheren Studien. In Fachdisziplinen mit standardisierter Forschungsmethodik ist dies eine geeignete Praxis, da Variablen und Forschungsmethoden bereits langjährig erprobt sind und nicht in jeder Untersuchung hinterfragt werden müssen. Gerade in der Konstruktionsforschung sollte jedoch ein stärkerer Fokus auf das qualitative Verständnis gelegt werden, da hier nicht auf etablierte Standards zurückgegriffen werden kann.

Dieses Kapitel basiert auf der Veröffentlichung „Supporting early stages of design method validation - an approach to assess applicability“ (Eisenmann, Grauberger & Matthiesen, 2021). Das Kapitel 6.3.1 ist in Teilen aus der Originalveröffentlichung (Abschnitt 3 „An approach to assess design method applicability“ im Original) nach Übersetzung sinngemäß übernommen und Nummerierungen sowie Begrifflichkeiten auf diese Arbeit angepasst.

Der entwickelte Detailprozess ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Er besteht aus zwei Iterationsschleifen, die sich mit den Forschungsmethoden zur Erhebung der Anwendbarkeit und der Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode befassen. Dadurch wird die Co-Evolution von Konstruktions- und Forschungsmethode auf Studienebene umgesetzt. Der Prozess und die darin enthaltenen Schritte werden im Folgenden ausführlicher beschrieben.

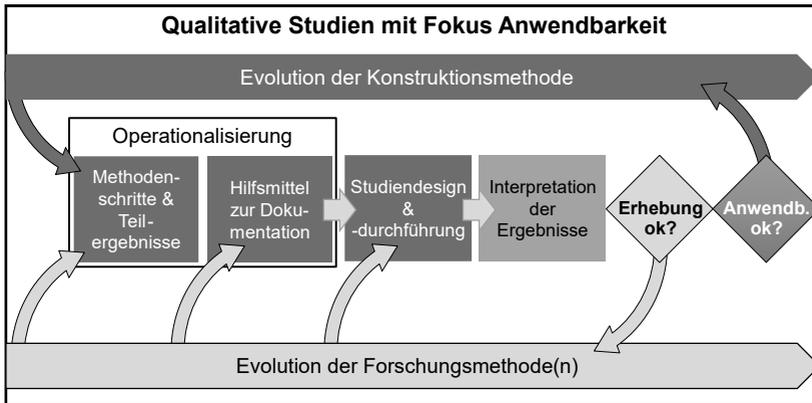


Abbildung 6.6: Detailprozess für qualitative Studien zur Anwendbarkeit. Abbildung basierend auf Eisenmann, Grauberger und Matthiesen (2021, S. 2824)

6.3.1.1 Operationalisierung

Der Detailprozess nutzt die folgenden Variablen für die Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden, die von Kroll und Weisbrod (2020) definiert wurden, die dazu das Framework von Motte und Eriksson (2016) verwenden (vgl. Kapitel 2.4.1): *Verständlichkeit*, *Benutzerfreundlichkeit* und *Korrektheit der Anwendung*. Die *Lehrfreundlichkeit* wurde nicht betrachtet, da sie sich nicht direkt auf die Konstruktionsmethode oder deren Anwendung bezieht. In der folgenden Beschreibung der Teilschritte wird jeweils auf den Einfluss auf die Variablen zur Anwendbarkeit eingegangen. Um die verschiedenen Variablen zur *Anwendbarkeit* differenzierter untersuchen zu können, sollte die Konstruktionsmethode auf geeignete Weise aufbereitet werden. Dazu sollen zunächst Schritte innerhalb der Konstruktionsmethode definiert und Teilergebnisse diesen Schritten zugeordnet werden. Anschließend werden Hilfsmittel für die Dokumentation der innerhalb der Methodenschritte erarbeiteten Teilergebnisse erstellt. Durch diese Aufbereitung der Beschreibung der Konstruktionsmethode können zum einen die oben beschriebenen Variablen trennschärfer in Bezug auf einzelne Bestandteile erfasst werden. Zum anderen wird verdeutlicht, welchen Beitrag welcher Teil des Vorgehens innerhalb der Konstruktionsmethode für die erwünschte Wirkung leistet. So wird eine qualitative Analyse dazu möglich, wie die Wirksamkeit der Konstruktionsmethode entsteht.

Definition von Schritten der Konstruktionsmethode und Teilergebnissen

In Anlehnung an die Argumentation von Pedersen et al. (2000) und Gericke et al. (2017) ist ein notwendiger Schritt bei der Validierung von Konstruktionsmethoden eine detaillierte Beschreibung der Konstruktionsmethode und des zugehörigen Ablaufs. Dies dient dazu, die interne Konsistenz zu überprüfen und sichtbar zu machen, wie die Kernidee der Methode umgesetzt werden soll.

Die Definition von Schritten im Methodenablauf ermöglicht eine bessere *Verständlichkeit* und fördert ein höheres Maß an *Korrektheit der Anwendung*. Präzise Schritte fördern außerdem eine detaillierte Beschreibung des Methodenablaufs. Der Methodenentwickler wird dadurch angeregt, über die für die Kernidee der Konstruktionsmethode notwendigen Aktivitäten für die Erreichung ihres Zwecks intensiver zu reflektieren. Es ist dabei entscheidend, nicht nur die Aktivitäten zu definieren, sondern auch, warum dieser spezielle Schritt zum Zweck der Methode beiträgt. Für kompliziertere Methoden, die aus vielen Schritten bestehen, die viele verschiedene Informationsquellen nutzen und unterschiedliche Ergebnisse produzieren, scheint eine detailliertere Visualisierung der Schritte, wie von Beckmann und Krause (2013) vorgeschlagen, angemessen. Eine detaillierte Visualisierung fördert zusätzlich die *Verständlichkeit*.

Indem für jeden durchgeführten Schritt ein Teilergebnis definiert wird, wird der Beitrag des Schritts zum Zweck der Methode greifbar und kann visualisiert werden, wie von Pedersen et al. (2000) vorgeschlagen. Das Teilergebnis sollte direkt mit der Dokumentation verknüpft werden, da eine detaillierte Dokumentation die Beurteilung der Anwendbarkeit in Bezug auf die *Korrektheit der Anwendung* ermöglicht.

Ergebnisse dieses Schritts sind: (1) eine Beschreibung der einzelnen Schritte der Methode, (2) die Teilergebnisse, die mit jedem Schritt erreicht werden sollen, und (3) die Folgen, die diese Ergebnisse für den weiteren Ablauf haben. Dabei dient (1) vorwiegend dazu, die Erhebung der *Anwendbarkeit* zu ermöglichen. (2) und (3) zielen darauf ab, die *Wirksamkeit* zu erfassen.

Durch die Festlegung von Schritten und Teilergebnissen wird die Zielsetzung der Konstruktionsmethode detaillierter aufgeschlüsselt. Dadurch bieten sich Potentiale für die Standardisierung durch das *Anstreben einheitlicher Methodenziele* (siehe Strategie A in Kapitel 5.2.2.1). Es können vergleichbare Konstruktionsmethoden identifiziert werden, die entweder ähnliche Teilergebnisse anstreben oder in ihrem Ablauf ähnliche Schritte beinhalten. Dadurch können Schlüsse auf gemeinsame grundlegende Mechanismen gezogen werden. Außerdem können potentiell geeignete Metriken für die Wirkungen der grundlegenden Mechanismen übernommen

werden. Handelt es sich um systematisch auftretende Wirkungen durch die grundlegenden Mechanismen, können diese zur Bildung neuer theoretischer Konstrukte beitragen.

Hilfsmittel zur Dokumentation erstellen

Hilfsmittel zur Dokumentation beziehen sich stark darauf, wie die Informationen in der Konstruktion dargestellt werden, wie von Gericke et al. (2017) beschrieben. In der Regel werden in den einzelnen Schritten der Konstruktionsmethode die Informationen verändert, zusammengefasst oder erweitert, um ein Endergebnis zu erzielen. Die Dokumentation sollte die Veränderung, Zusammenfassung oder Erweiterung, die in dem entsprechenden Methodenschritt stattfindet umfassen, um den Prozess sichtbar zu machen. Beispielsweise sollte ein Schritt zur Auswahl zwischen Alternativen die Dokumentation der verschiedenen Alternativen, der Gründe für die getroffene Entscheidung und des Ergebnisses der Entscheidung ermöglichen. Wenn die Darstellung der Informationen während eines Schritts verändert wird, kann dies unterschiedliche Hilfsmittel zur Dokumentation erfordern. Wenn ein Schritt beispielsweise darauf abzielt, ein Konzept für eine konstruktive Lösung zu finden, kann dies die Dokumentation von Anforderungen sowie grafische Darstellungen möglicher Konzepte zur Erfüllung dieser Anforderungen beinhalten. Eine angemessene Dokumentation ermöglicht so auch eine Bewertung der *Korrektheit der Anwendung*.

Ergebnisse dieses Schritts sind: Eine Beschreibung, wie die Ergebnisse der einzelnen Methodenschritte zu dokumentieren sind. Das kann auch den Einsatz von Werkzeugen beinhalten, zum Beispiel eine Dokumentvorlage für die Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse oder eine Beschreibung, welche Aspekte in einer technischen Zeichnung während der Funktionsanalyse hervorzuheben sind.

An dieser Stelle bieten sich erneut Potentiale für die Vergleichbarkeit. Die Dokumentation von Ergebnissen geschieht in der Regel durch Werkzeuge oder Modelle. Durch eine *Nutzung etablierter Werkzeuge und Modelle* (siehe Strategie B in Kapitel 5.2.2.1), bieten die Hilfsmittel zur Dokumentation die Chance, eine inhaltliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen anderer Konstruktionsmethoden herzustellen. Daher sollte nach der Erarbeitung der Beschreibung zur Dokumentation ein Abgleich mit der Dokumentation anderer Konstruktionsmethoden, welche dieselben Werkzeuge oder Modelle nutzen, stattfinden. Auf diese Weise können Gemeinsamkeiten identifiziert und reflektiert werden. Außerdem können auf diese Weise potentiell besser geeignete Werkzeuge und Modelle für die Dokumentation identifiziert werden.

6.3.1.2 Studiendesign und -durchführung

Der Aufbau der Studie sollte dem Studiendesign für spätere Validierungsschritte entsprechen, um die weitere Validierung vorzubereiten. Auf diese Weise kann das Studiendesign kontinuierlich weiterentwickelt werden (siehe Abbildung 6.6). Als Klasse von Studiendesigns ist das Probandenexperiment durch den Referenzprozess festgelegt. Einen Überblick, welche Aspekte bei der Gestaltung von Probandenexperimenten zur Validierung von Konstruktionsmethoden zu beachten sind, geben Üreten et al. (2019) in Form einer *Concept Map*. Dieser innerhalb eines gemeinsamen Forschungsvorhabens mit dem Autor dieser Arbeit konzipierte Überblick erlaubt eine Betrachtung verschiedener Erfolgskriterien in qualitativer und quantitativer Ausprägung. In der vorliegenden Arbeit sollen die Anwendbarkeit auf qualitative Weise (dieses Teilkapitel) und die Wirksamkeit auf quantitative Weise (siehe Kapitel 6.3.2) betrachtet werden.³ Für eine Klassifikation zu Experimenten in der Konstruktionsforschung und mögliche Varianten zur Umsetzung kann eine Übersicht im Anhang von DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 264–268) genutzt werden. Für eine umfassendere Beschreibung zu Probandenexperimenten in der Konstruktionsforschung kann zum Beispiel auf P. Cash et al. (2016)⁴ zurückgegriffen werden.

Studienteilnehmende

Um die Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden zu untersuchen, sollten die Teilnehmenden zunächst unerfahren sowohl in der gestellten Aufgabe als auch mit der zu untersuchenden Konstruktionsmethode oder ähnlichen Konstruktionsmethoden sein. Teilnehmende mit umfangreicher Erfahrung haben tendenziell einen geringeren Bedarf an methodischer Unterstützung, da sie stattdessen implizite, zu Methoden vergleichbare Strategien anwenden (Daalhuizen & Badke-Schaub, 2011; Eisenmann & Matthiesen, 2020). Wenn die Teilnehmenden zudem bereits ähnliche Konstruktionsmethoden kennen, fällt ihnen die Anwendung möglicherweise leichter als potentiellen Mitgliedern der Zielgruppe ohne diese Erfahrung. Allerdings sollten die Teilnehmenden die grundlegenden Fähigkeiten mitbringen, um sowohl die Konstruktionsmethode anzuwenden als auch um die Aufgabenstellung bewältigen zu können. Die Anzahl der Teilnehmer sollte so niedrig gehalten werden, dass jeder einzelne Teilnehmer von den Forschern direkt beobachtet werden kann. So kann

³ Für andere Schritte in der Validierung von Konstruktionsmethoden können auch andere Erfolgskriterien wie die Akzeptanz auf qualitative Weise betrachtet werden, wie ausgeführt in Üreten et al. (2020)

⁴ Im Kapitel von Horváth (2016, S. 213) ist eine konkretere Orientierung in Form von Schritten für die Durchführung von Experimenten und Anbindung an die Theorie zu finden.

die Arbeit mit der Konstruktionsmethode in jedem Schritt detailliert dokumentiert werden.

Aufgabenstellung

Um die Wirkungen einer Konstruktionsmethode untersuchen zu können, ist es besonders wichtig, dass die Studienteilnehmenden einen Bedarf an methodischer Unterstützung haben, dem mit der untersuchten Konstruktionsmethode begegnet werden kann. Daher muss die Aufgabenstellung zur Anwendung der Konstruktionsmethode sorgfältig ausgewählt werden, um eine passende Herausforderung für die Studienteilnehmenden darzustellen. Ist die Aufgabe zu einfach, werden die Teilnehmenden keinen Anlass sehen, die Konstruktionsmethode tatsächlich anzuwenden. Ist die Aufgabe zu schwierig, könnten die unerfahrenen Teilnehmenden so überfordert sein, dass sie entweder direkt aufgeben oder trotz Anwendung der Konstruktionsmethode scheitern. Gleichzeitig darf die Aufgabenstellung nicht ausschließlich auf die Konstruktionsmethode zugeschnitten sein, sondern sollte repräsentativ für den durch die Methode adressierten Kontext und Wirkungsbereich sein, wie in Kriterium (3): *Angemessenheit der Aufgabenstellung* beschrieben.⁵

Die Aufgabenstellung bietet zusätzlich Potential, um die Vergleichbarkeit von Forschungsergebnissen zu Konstruktionsmethoden zu erhöhen. Können Studien zu vergleichbaren Konstruktionsmethoden im Vorfeld identifiziert werden, sollte geprüft werden, ob die verwendeten Aufgabenstellungen auch für die eigene Konstruktionsmethode zum Einsatz kommen können. Zum einen werden dadurch die Validierungsergebnisse zu den Konstruktionsmethoden besser vergleichbar und zum anderen können die Ergebnisse der vorhergehenden Studien als Benchmark für die eigene Konstruktionsmethode verwendet werden.

Einführung der Konstruktionsmethode

Die Einführung ist entscheidend für die *Verständlichkeit* der Konstruktionsmethode. Daher sollte in dieser frühen Phase der Validierung von Konstruktionsmethoden die Vorstellung, Erklärung und Einübung der Methode sorgfältig durchdacht werden. Die Einführung der Konstruktionsmethode kann potentiell so weit vereinfacht werden, dass ein Merkblatt zur Methodenbeschreibung ausreichend ist, wodurch eine reproduzierbare Einführung ermöglicht wird. Dies ist insbesondere in der nachfolgenden quantitativen Untersuchung relevant (siehe Kapitel 6.3.2.2). Eine solche

⁵ Eine ausführlichere Betrachtung zur Konzeption geeigneter Aufgabenstellungen für empirische Studien in der Konstruktionsforschung gibt Bernd Bender (2003).

Vereinfachung ist jedoch nur möglich, wenn zuvor untersucht wurde, wie potentielle Nutzende die Konstruktionsmethode verstehen.

Datenerhebung und -analyse

Die Datenerhebung zur Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden sollte überwiegend qualitativ erfolgen, da das Hauptziel darin besteht, ein Verständnis zur Anwendung der Methode durch die Teilnehmenden und die dadurch entstehenden Auswirkungen aufzubauen. Das beinhaltet auch die Erfassung, wann und wie in der Anwendung die Wirksamkeit Konstruktionsmethode entsteht. Mögliche Erhebungsmethoden sind Interviews vor und nach der Anwendung der Konstruktionsmethode, Fragebögen mit offenen Fragen und direkte Beobachtung. Die Videoaufzeichnung der gesamten Studie ist oft nützlich, da jede Reaktion eines Teilnehmers Informationen über die Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode liefern kann. Außerdem sollten alle von den Teilnehmern durch bereitgestellte Dokumentationsmittel angefertigten Unterlagen gesammelt werden. Forscher können zusätzlich die Teilnehmer ermutigen, ihre Gedanken auf andere Weise zu dokumentieren, z. B. mit Skizzen.

Die Datenanalyse sollte ebenfalls qualitativ erfolgen, da eine Interpretation des Verhaltens und der Aussagen der Studienteilnehmer sowie die Dokumentation in Unterlagen notwendig ist. Die Analyse der gesamten Dokumentation ermöglicht so die Identifikation kritischer Schritte der Konstruktionsmethode, da die *Korrektheit der Anwendung* ersichtlich wird.

6.3.1.3 Interpretation der Studienergebnisse

Entscheidung zur Eignung von Forschungs- und Konstruktionsmethode

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Studie müssen Forscher entscheiden, ob Anpassungen in Bezug auf die Forschungsmethoden zur Erhebung der Anwendbarkeit oder die Konstruktionsmethode selbst erforderlich sind. Um diese Entscheidung zu treffen, müssen die Ergebnisse interpretiert werden, denn jedes Ergebnis kann sich auf die Erhebungsmethode, die Konstruktionsmethode oder sogar auf beides gleichzeitig beziehen. Bei der Interpretation von Ergebnissen zur Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode unterscheiden Üreten et al. (2017) zwischen zwei Arten von Schwierigkeiten: nutzerabhängige und methodenbezogene. Nutzerabhängige Schwierigkeiten müssen interpretiert werden, um über Anpassungen entweder im Studiendesign oder in der Beschreibung der Konstruktionsmethode zu entscheiden. Diese Schwierigkeiten können sich auf die *Verständlichkeit* der Konstruktionsmethode oder der Aufgabenstellung beziehen (z. B. verursacht durch die Wortwahl). Ein weiterer Aspekt kann die *Benutzerfreundlichkeit* sein, die sich aus der Art der Dokumentation oder den Fähigkeiten der Teilnehmer ergeben kann. Schwierigkeiten in Bezug auf die Konstruktionsmethode sollten weiter differenziert

werden, um die Ursache in der Methodenbeschreibung oder -einführung, den Hilfsmitteln zur Dokumentation oder der Passgenauigkeit von Aufgabenstellung zu Ziel und Kernidee der Konstruktionsmethode zu identifizieren.

6.3.2 Detailprozess für quantitative Studien mit Fokus Wirksamkeit

Ziel der quantitativen Studie ist es, Zusammenhänge zwischen der Anwendung der Konstruktionsmethode und auftretenden direkten Wirkungen in der Konstruktion zu identifizieren. Werden durch die Untersuchung signifikante Zusammenhänge zwischen der Anwendung und den gewünschten Wirkungen der Konstruktionsmethode sichtbar, kann ihre Wirksamkeit für die eingesetzte(n) Aufgabenstellung(en) als gegeben vorausgesetzt werden. Dadurch wird die Prüfung des *Nutzens* (Kriterium (4) des *Validation Square*) erfüllt. Die quantitative Untersuchung der Wirksamkeit bildet damit die Grundlage für die nachfolgende Untersuchung der Effektivität im realen (oder vergleichbaren) Kontext in der Validierung der Leistung. Im Hinblick auf die Forschungsmethoden soll die quantitative Studie zur Wirksamkeit darüber Aufschluss geben, ob die quantitativen Erhebungsmethoden für die Messung der Wirkungen in Bezug auf die Ziele der Konstruktionsmethode geeignet sind.

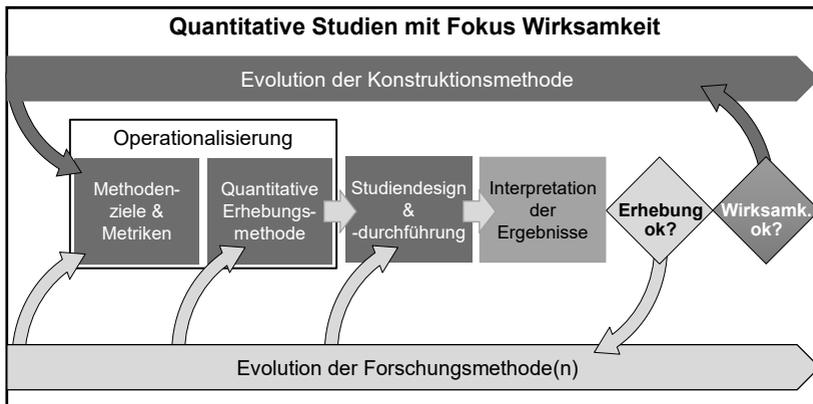


Abbildung 6.7: Detailprozess für quantitative Studien mit Fokus auf *Wirksamkeit*.

Der Detailprozess zur quantitativen Untersuchung der Wirksamkeit ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Im Detailprozess soll das Probandenexperiment aus der qualitativen Studie zur Anwendbarkeit genutzt, auf die Anforderungen der quantitativen Studie angepasst und weiterentwickelt werden. Das in der qualitativen Studie aufgebaute Verständnis zu den Wirkungen der Konstruktionsmethode wird dabei genutzt, um eine quantitative Erhebung zu konzipieren, die eine statistische Auswertung für die Effekte der Methode auf die Wirksamkeit ermöglicht. Die Umsetzung der einzelnen Schritte innerhalb des Detailprozesses wird im Folgenden detaillierter beschrieben.

6.3.2.1 Operationalisierung

Für eine Operationalisierung der Wirksamkeit einer Konstruktionsmethode müssen die gewünschten Auswirkungen der Methodenanwendung auf die Konstruierenden und den Konstruktionsprozess möglichst konkret beschrieben und erfassbar gemacht werden. Im Gegensatz zur Anwendbarkeit – wo der Stand der Forschung bereits übertragbare beobachtbare Variablen beschreibt – ist die Operationalisierung der Wirksamkeit deutlich individueller, da diese mit den Zielen der Konstruktionsmethode verknüpft ist. Mit Ausnahme einzelner Forschungsbereiche wie der Ideenfindung in der Konstruktion, kann in der Konstruktionsforschung bisher kaum auf etablierte Kriterien und beobachtbare Variablen zur Wirksamkeit zurückgegriffen werden (siehe Kapitel 5.2.2). Das macht die Operationalisierung der Wirksamkeit zu einer großen Herausforderung. Insbesondere, da auf eine möglichst hohe Übertragbarkeit geachtet werden soll.

Einen Ansatzpunkt zur Operationalisierung kann die qualitative Studie zur Anwendbarkeit bieten. Durch die enge Begleitung der Studienteilnehmer in der qualitativen Studie lässt sich ein Verständnis dazu aufbauen, wie die Konstruktionsmethode deren Verhalten in der Bearbeitung der Aufgabenstellung beeinflusst. Das Verständnis zu den der Verhaltensänderung zugrundeliegenden Wirkungen in Bezug zu den Zielen der Konstruktionsmethode kann dadurch zur Operationalisierung beitragen.

Festlegung zu erhebender beobachtbarer Variablen für die Wirksamkeit

Gibt es im Stand der Forschung bereits zu den Zielen der Konstruktionsmethode passende, etablierte latente Konstrukte und zugehörige beobachtbare Variablen, sollten diese für die Untersuchung der Wirksamkeit verwendet werden. Latente Konstrukte als Grundlage für die Erhebung können auch aus anderen Fachbereichen stammen (vgl. Kapitel 2.3.4).

Bestehen bisher keine etablierten beobachtbaren Variablen für die Ziele der Konstruktionsmethode, müssen diese für die Validierung entwickelt werden. Dabei soll darauf geachtet werden, dass die beobachtbaren Variablen nicht ausschließlich für

die Untersuchung der eigenen Konstruktionsmethode nutzbar sind, sondern prinzipiell auch für die Untersuchung vergleichbarer Konstruktionsmethoden verwendet werden können (siehe Strategie A in Kapitel 5.2.2.1). Das bedeutet, die Ziele der Konstruktionsmethode sollen möglichst auf allgemein relevante Aspekte in dem betrachteten Bereich der Konstruktion bezogen werden. Ein Beispiel bildet hier der Bereich der Entwicklung modularer Produktfamilien (vgl. Kapitel 5.2.2). Eine mögliche Optimierung von Produktarchitekturen in diesem Bereich zielt darauf ab, Komponenten möglichst häufig wiederverwenden zu können. Eine Möglichkeit, dies als beobachtbare Variable zu operationalisieren ist, für eine Komponente die Anzahl der Elternprodukte – also die Produkte, welche die Komponente beinhalten – zu ermitteln. So kann für ein Produkt der Produktfamilie ein Gemeinsamkeits-Index errechnet werden, der die Häufigkeit, mit der die beinhalteten Komponenten in anderen Elternprodukten auftauchen widerspiegelt. Einen solchen Gemeinsamkeits-Index nutzen beispielsweise Baylis et al. (2018), um eine Konstruktionsmethode für die Entwicklung modularer Produktfamilien zu validieren (vgl. Kapitel 5.2.2). Aktuelle, weiterführende Arbeiten wie beispielsweise von Schwede et al. (2022) integrieren zudem weitere Faktoren in die Betrachtung und beziehen diese auf übergeordnete latente Konstrukte.

Hier bietet sich zudem besonders die *Nutzung von Potentialen der Theorie* (siehe Strategie D in Kapitel 5.2.2.3) an, da mit Nutzung dieser Strategie bereits in der Theorie beschriebene Aspekte in Variablen für die Untersuchung überführt werden können. Zur Überführung in beobachtbare Variablen müssen diese Aspekte innerhalb des Probandenexperiments erfassbar gemacht werden.

Ergebnis des ersten Schritts ist die Beschreibung von zu erhebenden beobachtbaren Variablen, die die Wirksamkeit der Konstruktionsmethode abbilden können.

Implementierung einer quantitativen Erhebungsmethode

Um Zusammenhänge zwischen der Anwendung der Konstruktionsmethode und den gewünschten Wirkungen – repräsentiert durch die zuvor definierten beobachtbaren Variablen – quantitativ untersuchbar zu machen, muss das ursprüngliche Studiendesign um eine quantitative Erhebungsmethode ergänzt werden.

Es bietet sich dabei an, die in der qualitativen Studie erarbeiteten Mittel zur Dokumentation zu verwenden. Dabei soll darauf geachtet werden, dass nachvollziehbar bleibt, welche Ergebnisse die Studienteilnehmer in welchem Schritt der Konstruktionsmethode erarbeiten. Idealerweise beziehen sich die festgelegten beobachtbaren Variablen auf quantitativ erfassbare Eigenschaften entweder innerhalb der Dokumentation der Teilergebnisse oder in Bezug auf das Vorgehen der Teilnehmer. Je nach Zielsetzung der Konstruktionsmethode kann es sich dabei um die Erfassung

der Bearbeitungsdauer, dem Umfang oder Detailgrad der erarbeiteten Ergebnisse handeln. Teilergebnisse in z.B. CAD-Modellen oder Zeichnung können dabei durch geeignete Beurteilungskriterien objektiv bewertet werden.

Auf übergeordneter Ebene kann der Grad der Erfüllung der Aufgabenstellung zur Erhebung der Wirksamkeit genutzt werden. Voraussetzung dafür ist eine objektive und quantitative Bewertung des Grads der Erfüllung, z.B. durch die Ermittlung einer Punktzahl anhand eindeutiger Kriterien. Außerdem sollte die Aufgabenstellung dafür repräsentativ für das durch die Konstruktionsmethode adressierte Ziel sein. Sollen sich Denkweisen oder übergeordnete Kenntnisse durch die Anwendung der Konstruktionsmethode verändern, sind gegebenenfalls spezifische, zusätzliche Verfahren notwendig.

In der Umsetzung der Erhebungsmethode sollen Kriterien für die aufzunehmenden Daten beachtet (siehe auch Robinson, 2016) und eine statistische Auswertung der Ergebnisse vorgedacht werden. Außerdem sollten Möglichkeiten zur standardisierten und automatisierten Erhebung der beobachtbaren Variablen genutzt werden, da auf diese Weise zum einen die Objektivität und zum anderen die Reproduzierbarkeit der Datenerhebung erhöht werden kann.

Insbesondere in Experimenten mit Versuchspersonen sind verschiedene Störvariablen zu beachten, die die Aussagekraft der erhobenen Daten maßgeblich beeinflussen. Störvariablen treten vorwiegend in den folgenden drei Kategorien auf (vgl. Hussy et al., 2013):

- *Versuchspersonenmerkmale* wie Vorkenntnisse, Alter, Geschlecht, Intelligenz, etc. der Studienteilnehmer
- *Situationsmerkmale* aus dem Untersuchungskontext: z.B. Tageszeit, Beleuchtung, Untersuchungsmaterial.
- *Versuchsleitermerkmale*, womit vorwiegend die Wirkung auf die Studienteilnehmer beschrieben wird.

Die Beeinflussung der Ergebnisse durch die Störvariablen kann durch verschiedene Kontrolltechniken abgemildert oder sogar eliminiert werden. Daher sollen die folgenden Kontrolltechniken (Hussy et al., 2013) vor der Studiendurchführung auf ihre Anwendbarkeit geprüft und wenn möglich umfassend umgesetzt werden:

- Zur Kontrolle von *Versuchsleiter- & Situationsmerkmalen*
 - Konstanthaltung beinhaltet alle Maßnahmen zur Standardisierung der Untersuchungssituation

- Elimination einer Störvariablen, wie z.B. ersetzen der Versuchsleitung durch digitale Werkzeuge
- Zusätzlich zur Kontrolle von Probandenmerkmalen:
 - systematische Variation durch Kontrolle einer potenziellen Störvariable und Transformation zu einer weiteren unabhängigen Variablen im Experiment
 - zufällige Variation durch Zuweisung der Störvariable in verschiedenen Ausprägungen zufällig zu den Studienteilnehmern
- Hauptsächlich zur Kontrolle von Probandenmerkmalen:
 - Randomisieren, also zufällige Zuordnung zu den Experiment-Bedingungen (z.B. welche Gruppe). Ziel ist die statistische Äquivalenz (Vergleichbarkeit) in Bezug auf alle Störvariablen
 - Parallelisieren: In der Kontrollgruppenaufgabe wird eine Rangreihe für bekannte Störvariable(n) erstellt. Benachbarte Probanden werden verschiedenen Gruppen zugewiesen
- Kontrolle von Versuchsleitermerkmalen:
 - Blindversuche: Versuchsleiter kennt die zu prüfende Hypothese nicht und kann den Verlauf daher nicht in eine gewünschte Richtung beeinflussen

Ergebnis dieses Schritts ist eine Erhebungsmethode für die zuvor festgelegten beobachtbaren Variablen für die Wirksamkeit der Konstruktionsmethode in Bezug auf die Aufgabenstellung(en).

6.3.2.2 Studiendesign und -durchführung

Für die quantitative Studie sollte soweit möglich das in der qualitativen Studie bewährte Studiendesign beibehalten werden. Die Erfahrungen aus der qualitativen Studie können so leichter übertragen und genutzt werden. Die qualitative Studie zur Anwendbarkeit kann dadurch als Vorstudie für die quantitative Studie zur Wirksamkeit gesehen werden. Allerdings stellt die quantitative Untersuchung andere Anforderungen an die Untersuchung, weshalb Adaptionen notwendig sind.

Studienteilnehmende

Ähnlich zur qualitativen Untersuchung zur Anwendbarkeit sind auch in der quantitativen Studie zur Wirksamkeit unerfahrene Studienteilnehmer von Vorteil. Die durch die Konstruktionsmethode erzielbaren Wirkungen fallen potentiell stärker aus, wenn nicht auf Vorerfahrungen zurückgegriffen werden kann, und sind dadurch leichter zu erfassen. Probandenexperimente sollen unter möglichst kontrollierten Bedingungen stattfinden. Dadurch bestehen hohe Anforderungen an die interne Validität.

Deshalb sollte die Gruppe der Studienteilnehmer möglichst homogen in ihren Fähigkeiten und Kenntnissen bezüglich der Aufgabenstellung sein. Gleichzeitig sollen die Fähigkeiten zur Bewältigung der Aufgabe ausreichend sein.

Für quantitative Studien sind in der Regel eine höhere Anzahl an Studienteilnehmenden notwendig als für qualitative Untersuchungen, um statistisch signifikante Aussagen zu den Wirkungen der Konstruktionsmethode ableiten zu können. Die mindestens benötigte Anzahl an Teilnehmern hängt von der Art der Skalierung der erfassten beobachtbaren Variablen, der Streuung der Messung sowie der Stärke des zu erwartenden Effekts ab.

Aufgabenstellung

Wurde die Aufgabenstellung im Zuge der Implementierung der Erhebungsmethode abgeändert müssen die Einflüsse auf die Aussagekraft der Ergebnisse analysiert werden. Für eine objektivere und effizienter auszuwertende Erhebung der Wirksamkeit werden beispielsweise Freitextantworten auf Multiple-Choice angepasst. In diesem Fall muss entschieden werden, ob die korrekte Auswahl einer Lösung in Schwierigkeit und Aussagekraft der eigenständigen Formulierung durch die Teilnehmenden gleichzusetzen ist.

Werden mehrere Aufgaben verwendet, die im Studiendesign kombiniert werden, kann eine Abwägung der Vergleichbarkeit vor Durchführung der Studie hilfreich sein. Dadurch wird ähnlich zur Homogenität der Studienteilnehmer auch die Homogenität der Aufgabenstellungen erhöht. Eine Einschätzung zu den Aufgabenstellungen kann beispielsweise unter Verwendung des Ansatzes von Patel et al. (2019) durchgeführt werden.

Einführung der Konstruktionsmethode

Das Verständnis einer Konstruktionsmethode wird maßgeblich dadurch beeinflusst, wie sie eingeführt wird. Führt die Studienleitung die Konstruktionsmethode durch eine Schulung ein, ist die Reproduzierbarkeit der Einführung gering. Daher sollte die Einführung der Konstruktionsmethode möglichst reproduzierbar durch eine digitale Schulung, ein Schulungsvideo oder durch ein Informationsblatt erfolgen (vgl. Kapitel 6.3.1.2). Die Einübung der Anwendung der Methode kann, wenn möglich, ebenfalls digitalisiert und mit automatisiertem Feedback erfolgen. Auf diese Weise kann eine höhere Anzahl von Studienteilnehmern effizient und reproduzierbar in der Methode geschult werden.

Datenerhebung & -analyse

Die Datenerhebung soll wie bereits im Erhebungsmethode beschrieben möglichst standardisiert erfolgen und eine statistische Analyse ermöglichen. Welche statistische Analyse am besten geeignet ist, hängt stark von den Rahmenbedingungen ab. Einen knappen Überblick inklusive Beispielen, welche Verfahren zur statistischen Datenanalyse im Kontext von Probandenexperimenten in der Konstruktionsforschung eingesetzt werden können gibt Robinson (2016, S. 55–58).

6.3.2.3 Interpretation der Studienergebnisse

Entscheidung zur Eignung der Erhebungsmethode für die Wirksamkeit

Die Eignung der Erhebungsmethode bezieht sich darauf, ob sie tatsächlich in der Lage ist, die zu Beginn festgelegten beobachtbaren Variablen zu erfassen. Letztlich soll also die Validität der Erhebungsmethode bewertet werden. Dazu müssen im Vorfeld auch die für Validität notwendigen Gütekriterien Objektivität und Reliabilität auf geeignete Weise geprüft werden. Diese Prüfung muss für jeden Fall individuell erfolgen und kann sich im Fall von Probandenexperimenten auf spezielle Teilaspekte der Gütekriterien (Hussy et al., 2013) beziehen:

- **Objektivität:**
 - Durchführungsobjektivität
 - Auswertungsobjektivität
 - Interpretationsobjektivität
- **Reliabilität:**
 - Stabilität: vergleichbare Ergebnisse bei wiederholter Durchführung
 - Paralleltest-Reliabilität: vergleichbare Ergebnisse bei der Verwendung von zwei gleichwertigen Tests
- **Validität:**
 - interne Validität, also führt tatsächlich die Methodenanwendung zu den identifizierten Auswirkungen
 - externe Validität bezeichnet die Übertragbarkeit der Ergebnisse und damit das Ausmaß der Generalisierbarkeit (vgl. Kriterium 6, Kapitel 2.3.3)
 - Populationsvalidität: Wie repräsentativ die Stichprobe für die angestrebte Population ist
 - Situationsvalidität: Welche Aspekte realer Kontexte sind bereits umgesetzt?
 - Variablenvalidität: Können auch mit anderen, etablierten Operationalisierungen vergleichbare Ergebnisse erreicht werden?

Entscheidung zur Wirksamkeit der Konstruktionsmethode

Konnte zuvor die Erhebungsmethode als ausreichend valide eingeschätzt werden, kann anschließend die Wirksamkeit der Konstruktionsmethode auf Grundlage der Ausprägungen der erhobenen Variablen bewertet werden. Grundvoraussetzung dazu ist jedoch die korrekte Anwendung der Konstruktionsmethode zur Erfüllung von Kriterium (5) des *Validation Square*. Zusätzlich soll auch die Eignung der verwendeten beobachtbaren Variablen auf Grundlage der Studienergebnisse hinterfragt werden.

Abschließend kann im Hinblick auf Kriterium (4): *Nutzen* eine Bewertung der Wirksamkeit der Konstruktionsmethode vorgenommen werden. Diese Bewertung ist Grundlage für die Entscheidung, ob die Konstruktionsmethode weiterentwickelt werden muss oder mit der empirischen Validierung in Bezug zur Leistung fortgefahren werden kann.

6.4 Fazit zur präskriptiven Studie

Mit der Synthese des Referenzprozesses **Validierungs-Navigator** (siehe Abbildung 6.8) konnte Forschungsfrage 2: „*Wie können die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung und aus der Analyse der aktuellen Forschungspraxis zur Methodenvalidierung in einem Referenzprozess zur Unterstützung des Aufbaus von vergleichbaren Studien kombiniert werden?*“ beantwortet werden.

Der Referenzprozess soll zum einen die Studienqualität beim Aufbau von Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden und zum anderen die Vergleichbarkeit von Validierungsstudien positiv beeinflussen. Der zuvor beschriebene Referenzprozess wird daher im Folgenden in Bezug auf beide Aspekte reflektiert.

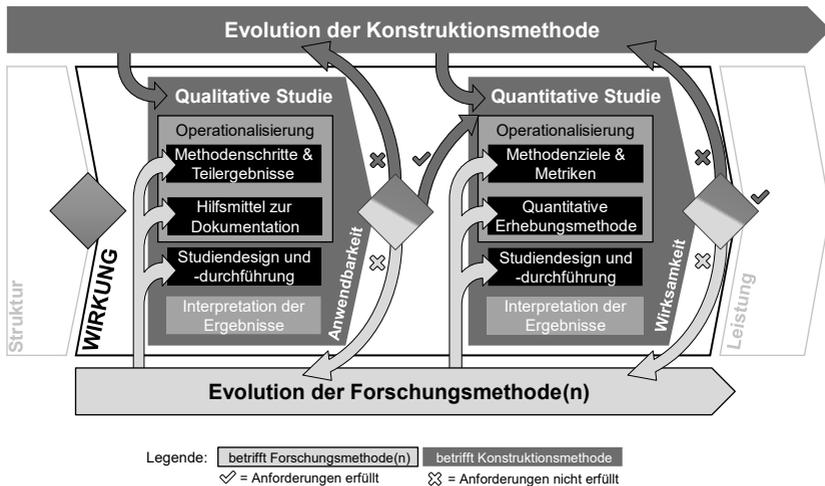


Abbildung 6.8: Der entwickelte Referenzprozess *Validierungsnavigator* bestehend aus einer qualitativen Studie mit Fokus auf Anwendbarkeit und einer quantitativen Studie mit Fokus auf Wirksamkeit. Sind bereits etablierte Variablen und zugehörige Erhebungsmethoden vorhanden, entfällt der die Forschungsmethoden betreffende Anteil (hellgrau hinterlegt). Sind keine etablierten Forschungsmethoden vorhanden, entsteht eine Co-Evolution von Konstruktions- und Forschungsmethode. Die daraus entstehenden Forschungsmethoden sind nach ihrer Entwicklung weiter zu prüfen. Abbildung in Anlehnung an Eisenmann und Matthiesen (2022).

6.4.1 Beitrag zur Studienqualität

Der beschriebene Referenzprozess kann den Aufbau von Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden auf verschiedenen Detailgraden unterstützen. Er stellt sowohl ein Forschungsdesign durch eine Abfolge durchzuführender Studien als auch ein detaillierteres Vorgehen zum Aufbau und zur Durchführung der beschriebenen Studien bereit. Das Vorgehen zur Validierung der Wirkung wird dabei in eine Abfolge von zwei aufeinander aufbauenden Studien mit Fokus auf Anwendbarkeit und Wirksamkeit der Konstruktionsmethode konkretisiert. Ein in der qualitativen Stu-

die mit Fokus Anwendbarkeit aufgebautes Verständnis zu den Wirkungen der Konstruktionsmethode kann maßgeblich dazu beitragen, eine valide Operationalisierung für die quantitative Studie durchzuführen.

Mithilfe des *Validation Square* (vgl. Kapitel 2.3.3) konnten zu prüfende Kriterien für den Beginn des Referenzprozesses und nach jeder der beiden Studien definiert werden. Auf diese Weise regen die Kriterien an geeigneter Stelle dazu an, die Studien in Bezug auf ihre Qualität zu reflektieren. Dabei werden durch die Kriterien des *Validation Square* die Konstruktionsmethode selbst, die in der Studie verwendete Aufgabenstellungen und die verwendeten Erhebungsmethoden und beobachtbaren Variablen adressiert.

Zusätzlich wurden in den Detailprozessen zu den einzelnen Studien an geeigneter Stelle Maßnahmen beschrieben, um die Erfüllung der Gütekriterien Objektivität, Reliabilität und Validität zu begünstigen. Zusätzlich wurden Hinweise zu geeigneter Literatur zu empirischen Studien sowie speziell zu Experimenten in der Konstruktionsforschung gegeben. Durch die Nutzung von *Impact Models* zur Definition der Untersuchungsziele und des angestrebten Kontextes kann außerdem ein Beitrag zur externen Validität der Validierung der Wirkung geleistet werden.

6.4.2 Beitrag zur Vergleichbarkeit von Validierungsstudien

Durch die Eingrenzung des zu verwendenden Studiendesigns auf Probandenexperimente wird die Identifikation vergleichbarer Studien zur Nutzung als Benchmarks oder als Referenz vereinfacht. Zusätzlich werden unter Nutzung des *Validation Square* Kriterien beschrieben, die einen Vergleich des Fortschritts der Validierung zwischen mehreren Konstruktionsmethoden ermöglichen machen. Auf diese Weise konkretisiert der Referenzprozess auf verschiedenen Detailgraden das Vorgehen im Vergleich zu bestehenden Ansätzen und schafft eine Vergleichbarkeit der Vorgehensweise im Detail.

Für eine höhere Anwendbarkeit des Referenzprozesses orientiert sich dieser an der realen Forschungspraxis der Validierung von Konstruktionsmethoden. Zwangsläufig auftretende Iterationen in der Validierung von Konstruktionsmethoden werden im Referenzprozess abgebildet und Prüfkriterien beschrieben, die bei Nichterfüllung diese Iterationen auslösen. Durch die Co-Evolution von Forschungs- und Konstruktionsmethode wird außerdem einbezogen, dass aktuell kaum etablierte Erhebungsmethoden und zugehörige Variablen vorhanden sind und diese während der Methodenvalidierung entwickelt und fortlaufend optimiert werden müssen. Zusätzlich sind im Referenzprozess erfolgreiche Strategien aus der Forschungspraxis (siehe Kapitel 5.3) integriert, um Forschenden an geeigneter Stelle zur Verfügung zu stehen.

Durch die Vorgabe, für die Validierung der Wirksamkeit Probandenexperimente durchzuführen, kann eine Vereinheitlichung des Studiendesigns für diesen Validierungsschritt vorantreiben, was eine Vergleichbarkeit in Bezug auf die Vorgehensweise begünstigt. Zusätzlich fördern die Strategien aus der Forschungspraxis (siehe Kapitel 5.3) die Anknüpfung an bestehende Erhebungsmethoden und an die Theorie, was die inhaltliche Vergleichbarkeit der entstehenden Validierungsergebnisse erhöht. Werden zusätzlich Visualisierungen der Ziele und Wirkungen von Konstruktionsmethoden – beispielsweise durch *Impact Models* – verwendet, kann die Identifikation von Klassen von Konstruktionsmethoden für Bereiche innerhalb der Konstruktion mit den zugehörigen Studien zu deren Validierung vereinfacht werden.

6.4.3 Potentieller Beitrag zur Standardisierung

Der Referenzprozess bietet auf verschiedene Weise Potentiale, eine Standardisierung von Forschungsmethoden zur Methodenvalidierung zu begünstigen. Die Sichtweise der Co-Evolution von Forschungs- und Konstruktionsmethode kann die Diskussion zu neu entwickelten Erhebungsmethoden und Variablen sowie zu ihrer Eignung ermöglichen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Entwicklung neuer Variablen und Erhebungsmethoden passend zu mehreren Konstruktionsmethoden stattfindet. Besonders geeignete Erhebungsmethoden und Variablen können für die Validierung verschiedener Konstruktionsmethoden eingesetzt werden und sich dadurch für die Untersuchung einer Klasse von Konstruktionsmethoden als Standard etablieren. Die Co-Evolution sollte nur so lange angewendet werden, bis sich Variablen und Erhebungsmethoden für einen Teilbereich entwickelt haben. Die entwickelten Erhebungsmethoden sollten anschließend in separaten Studien geprüft werden. Ab diesem Zeitpunkt sollen bestehende Variablen und Erhebungsmethoden als Benchmarks genutzt werden, wie in der Forschung an Ideenfindungsmethoden (vgl. Kapitel 5.2).

Inwieweit der Referenzprozess die an ihn gestellten Anforderungen auch in der praktischen Anwendung erfüllen kann, ist Gegenstand der Evaluation im Rahmen der zweiten deskriptiven Studie im folgenden Kapitel.

7 Zweite deskriptive Studie – Evaluation des Referenzprozesses

Ziel der zweiten deskriptiven Studie ist die Evaluation des zuvor dargestellten Referenzprozesses *Validierungs-Navigator*, um Forschungsfrage 3: „*Welchen Einfluss hat die Anwendung des Referenzprozesses auf die Qualität und Vergleichbarkeit von Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden?*“ zu beantworten. Im Folgenden wird dazu die exemplarische Anwendung des Referenzprozesses zur Validierung einer Konstruktionsmethode zur Modellbildung dargestellt und der Referenzprozess auf Grundlage der Studienergebnisse auf seine Einflüsse auf Qualität und Vergleichbarkeit der durchgeführten Studien reflektiert. In Kapitel 7.1 wird dazu das Fallbeispiel vorgestellt und die Ausgangssituation für die Methodenvvalidierung beschrieben. Kapitel 7.2 und Kapitel 7.3 beschreiben anschließend die Durchführung und Reflexion einer qualitativen und einer quantitativen Studie zur Validierung der Wirkung. Die Kapitelstruktur orientiert sich dabei an den Schritten des jeweiligen Detailprozesses (siehe Kapitel 6.3) innerhalb des Referenzprozesses. Beide Kapitel schließen mit einer Diskussion zur Eignung des jeweiligen Detailprozesses. In Kapitel 7.4 wird dann ein abschließendes Fazit zum *Validierungs-Navigator* abgeleitet.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Darstellung der Einflüsse und Einschränkungen des Referenzprozesses im Hinblick auf die Qualität und Vergleichbarkeit von Studien in der Validierung von Konstruktionsmethoden fokussiert werden. Daher werden die beiden durchgeführten Studien nicht in vollem Umfang beschrieben, sondern auf diejenigen Anteile fokussiert, die sich zum einen auf die Qualität und Vergleichbarkeit der Untersuchung und zum anderen auf eine Weiterentwicklung von Konstruktions- und Erhebungsmethode beziehen.

7.1 Fallbeispiel zur qualitativen Modellbildung

Zur exemplarischen Anwendung des Referenzprozesses wurde die *Modellbildung mit Contact-und-Channel-Ansatz (C&C²-A)* für die Untersuchung der Wirksamkeit ausgewählt. Der C&C²-A wurde von Matthiesen (2002) als Metamodell für die Bildung von qualitativen Modellen in der Analyse von technischen Systemen entwickelt. Der Ansatz beinhaltet die Definitionen von neun Modellelementen sowie drei Grundhypothesen (Matthiesen et al., 2018; Matthiesen, 2021), wodurch die Bausteine und Grundregeln zum Aufbau von C&C²-Modellen beschrieben werden.

7.1.1 Ausgangssituation Konstruktionsmethode

Durch die Entwicklung eines Vorgehens zur Modellbildung mit dem C&C²-A (Matthiesen et al., 2018; Matthiesen, 2021) entstand eine Konstruktionsmethode, die die Elemente des Metamodells zur qualitativen Modellbildung nutzt (siehe Abbildung 7.1). Diese verfolgt das Ziel, Verständnis zum technischen System aufzubauen und dadurch die Weiterentwicklung eines Systems in einem Syntheseschritt möglich zu machen. Damit bildet die *Modellbildung mit C&C²-A* eine Unterstützung für die Gestaltung technischer Systeme.

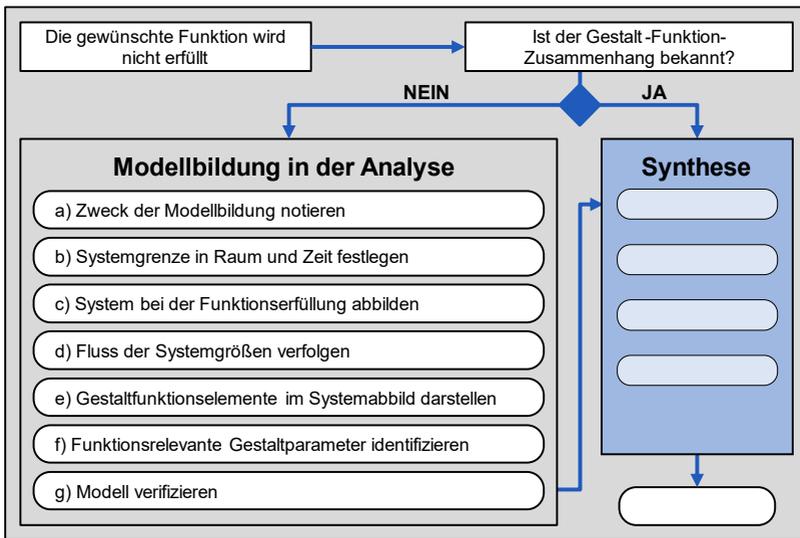


Abbildung 7.1: Modellbildung in der Analyse (Abbildung nach Matthiesen et al., 2018, S. 9). Es ist zu erkennen, dass das übergeordnete Ziel der Modellbildung die Identifikation von Gestaltparametern ist, welche die Funktion maßgeblich beeinflussen. Das entstehende *Verständnis zum technischen System* wird dann in der Synthese zur Weiterentwicklung der vorliegenden Produktgestalt genutzt.

Kennzeichnend für das in Abbildung 7.1 dargestellte Vorgehen zur qualitativen Modellbildung ist, dass es neben der Bildung von C&C²-Modellen auch zur Bildung anderer Modelle eingesetzt werden kann. Bedingung dafür ist, dass die Modelle

ebenso wie C&C²-Modelle ein qualitatives Abbild des technischen Systems verwenden (vgl. Schritt c)) in Abbildung 7.1) und sowohl die Gestalt in Form von geometrischen Parametern als auch das Verhalten und die Funktion des Systems in die Modellbildung einbeziehen. Auf Grundlage einer Klassifikation von Modellen in der Produktentwicklung von Matthiesen et al. (2019) sind daher die folgenden Beispiele vergleichbar mit C&C²-Modellen:

- Wirkraummodell (Beetz & Kirchner, 2019)
- Entwurfsskizzen (oder Reihen davon) (Andreasen et al., 2015)
- symbolische Darstellungen (Andreasen et al., 2015)
- SysML-Modelle wie umgesetzt in Wölkl und Shea (2009)
- Kombination von Skizzen mit SysML (Moeser et al., 2015)

C&C²-Modelle (z.B. in Gladysz & Albers, 2018) sowie die zuvor genannten weiteren Modelle wurden zwar bereits in Probandenstudien untersucht, jedoch stand dabei die Nutzung der Modelle selbst im Fokus. Es konnte keine Studie identifiziert werden, die den Einfluss der Modellbildung – also einen maßgeblichen Anteil der Konstruktionsmethode – oben genannter Modelle auf das Systemverständnis der Methodenanwendenden untersucht.

Durch die ähnliche Beschaffenheit aller genannten Modelle und ein Vorgehen zur Modellbildung, das prinzipiell übertragbar auf andere Ansätze ist, weist die Modellbildung mit C&C²-A eine hohe Vergleichbarkeit zu diesen Ansätzen auf. Daher könnte eine Untersuchung zur Modellbildung mit C&C²-A zukünftig als Benchmark für andere Untersuchungen zur Modellbildung herangezogen werden.

7.1.2 Einbettung in den Prozess der Methodenvvalidierung

Um die Untersuchung der Modellbildung mit C&C²-A, wie in Kapitel 6.2.1.1 beschrieben, in den Prozess der Methodenvvalidierung einzubetten, sollen die erwarteten Wirkungen der Anwendung der Konstruktionsmethode in geeigneter Weise dargestellt werden. Hierfür wurde in Vorbereitung auf die Validierung der Wirksamkeit ein *Impact Model* erarbeitet (siehe Abbildung 7.2). Aus verschiedenen Quellen ist bekannt, dass ein Zuwachs im Systemverständnis – also dem Verständnis der Ursache-Wirkungs-Beziehungen im technischen System – dazu führt, dass weniger Ressourcen für eine Weiterentwicklung des Systems in Iterationen notwendig sind. Zum einen können notwendige Iterationen durch ein gutes Verständnis effizienter durchgeführt werden und zum anderen kann die Anzahl notwendiger Iterationen reduziert werden (Smith & Eppinger, 1997).

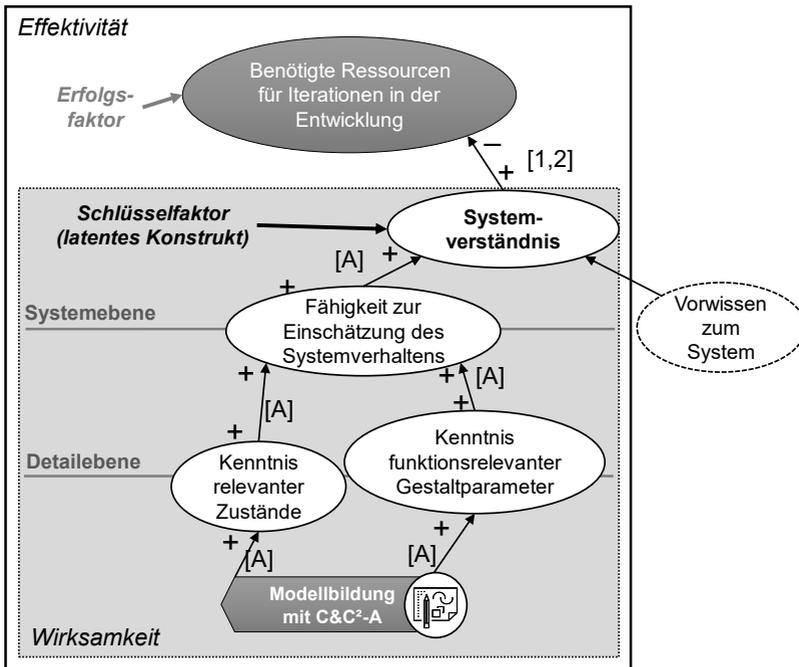


Abbildung 7.2: *Impact Model* zur Veranschaulichung der Auswirkungen der Konstruktionsmethode *Modellbildung mit C&C²-A* auf die Produktentwicklung. Mit [A] gekennzeichnete Zusammenhänge basieren auf Annahmen, die durch eine Untersuchung geprüft werden müssen. Mit Zahlen versehene Zusammenhänge sind bereits in den referenzierten Veröffentlichungen beschrieben ([1] (Smith & Eppinger, 1997); [2] (Wynn & Eckert, 2017)). Das *Impact Model* spiegelt die Annahme wider, dass die Konstruktionsmethode über Zwischenschritte das Verständnis des vorliegenden technischen Systems verbessert und damit die für die Produktentwicklung benötigten Ressourcen positiv beeinflusst. Der grau hinterlegte Bereich steht im Zentrum der im Folgenden (Kapitel 7.2 & 7.3) beschriebenen Untersuchung der Wirksamkeit.

Die Modellbildung mit C&C²-A hat das Ziel, Systemverständnis für die Gestaltung zu generieren, das im Vorwissen fehlt. Dies soll durch die Unterstützung der Identifikation funktionsrelevanter Systemzustände und Gestaltparameter erreicht werden.

Die gewonnenen Kenntnisse sind die Grundlage für die Fähigkeit, eine Einschätzung zum Systemverhalten vorzunehmen (vgl. Abbildung 7.2). Die Abstufung in Kenntnisse zu den Details des Systems und der Fähigkeit, das Verhalten eines Systems zu beurteilen, basiert auf der Bloom'schen Taxonomie (Bloom et al., 1956) nach der Wissen (also Kenntnisse) eine notwendige Bedingung für eine Analyse und Bewertung sind. Johnson und Satchwell (1993, S. 80) definieren technisches Systemverständnis als „die Fähigkeit Systemwissen auf eine sinnvolle Weise zu nutzen und qualitativ über drei Aspekte des Systems argumentieren zu können: (a) die Struktur des Systems, (b) die Funktion der Komponenten des Systems und (c) das Verhalten dieser Komponenten in Interaktion mit anderen Komponenten des Systems“. Das in Abbildung 7.2 dargestellte *Impact Model* ist in mehreren Punkten vergleichbar zu dieser Definition. Über die Zustände und Gestaltparameter können die Struktur (a) und die Funktion der Komponenten (b) im Detail beschrieben werden. Die Fähigkeit, das Systemverhalten einschätzen zu können ist im Rahmen der Konstruktion eine sinnvolle Anwendung für das Verhalten der Komponenten (c).

C&C²-Modelle werden bereits seit mehr als 20 Jahren in Entwicklungs- und Forschungsprojekten eingesetzt (Grauberger et al., 2020), wodurch die einzelnen Komponenten der Konstruktionsmethode als geeignet eingestuft wurden (siehe Kriterium 1). Das Vorgehen zur Modellbildung wurde im Rahmen der Entwicklung bereits auf logische Konsistenz geprüft (siehe Kriterium 2). Damit wird die *Strukturvalidierung* für die Modellbildung mit C&C²-A als abgeschlossen angesehen.

7.1.3 Grundstruktur Studiendesign

Der Referenzprozess gibt als Grundlage für das Studiendesign Probandenexperimente vor. Das bedeutet, dass sowohl in der qualitativen als auch in der quantitativen Studie eine Kontrollgruppe ohne Kenntnis der zu untersuchenden Konstruktionsmethode mit einer in der Methode geschulten Testgruppe verglichen werden muss. Für die Grundstruktur des Studiendesigns wurde ein Ablauf gewählt, in dem alle Teilnehmer eine Aufgabe als Teil der Kontrollgruppe und eine als Teil der Testgruppe bearbeiten¹ (siehe Abbildung 7.3). Daher werden zwei technische Systeme als Stimuli benötigt. Das erste System analysieren die Studienteilnehmer unbeeinflusst und damit intuitiv vor der Methodeneinführung, das zweite System unter Zuhilfenahme der Konstruktionsmethode nach der Einführung. Auf diese Weise wird die effektive Anzahl der Teilnehmer verdoppelt, wodurch eine geringe Verfügbarkeit von Studienteilnehmern kompensiert werden kann. Gleichzeitig wird bei der Verwendung von zwei technischen Systemen ein Lerneffekt in Bezug auf den Stimulus

¹ auch als Messwiederholung in Hussy et al. (2013) bezeichnet.

ausgeschlossen. Zusätzlich reduziert dieses Vorgehen eine Abhängigkeit der Ergebnisse von einem einzelnen Stimulus. Diese Grundstruktur des Studiendesigns ermöglicht es, sowohl die Daten für jeden Studienteilnehmer als auch für jeden verwendeten Stimulus spezifisch auszuwerten. Eine Einschränkung dieses Studiendesigns besteht darin, dass potentielle Lerneffekte² in der Vorgehensweise zur Analyse technischer Systeme die Auswirkungen der Methodenschulung überlagern können. Die zuvor geschilderten positiven Auswirkungen der Grundstruktur des Studiendesigns überwiegen einen potentiellen Lerneffekt in Bezug auf die Vorgehensweise.

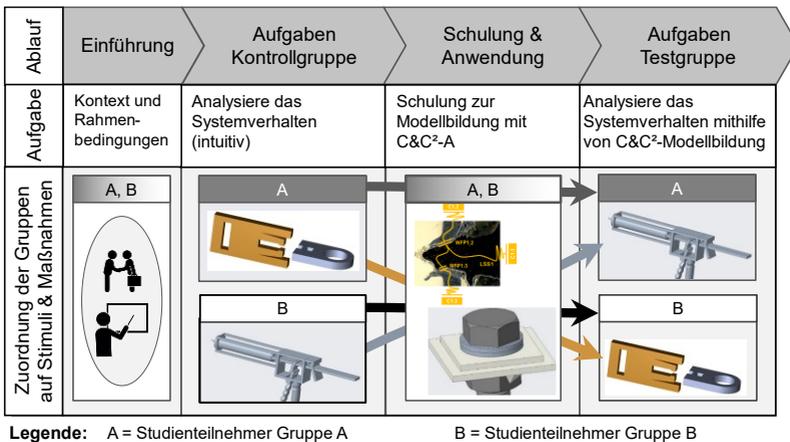


Abbildung 7.3: Grundstruktur des Studiendesigns zur Untersuchung der Wirksamkeit der Modellbildung mit C&C²-A (Grauberger et al., 2022, S. 15). Es wurden zwei technische Systeme als Stimuli verwendet: Ein Rasthaken und eine Kartuschenpresse. Jeder der Studienteilnehmenden analysiert im Studienverlauf beide Systeme, jeweils eines vor und eines nach der Methodenschulung. Die technischen Systeme sollten darauf geprüft werden, ob sie als äquivalente Stimuli in Bezug auf die Aufgabenstellung angesehen werden können. Sind sie äquivalent, können auf diese Weise sowohl Veränderungen im Systemverständnis in Bezug auf einzelne Teilnehmende als auch in Bezug auf das technische System betrachtet werden.

² In Hussy et al. (2013) werden solche Effekte den *Positionseffekten* zugeordnet.

Als Aufgabenstellung wurde eine Funktionsanalyse technischer Systeme gewählt. Die Teilnehmenden sollten das jeweilige technische System so analysieren, dass sie anschließend in der Lage sind, die Funktionsqualität gegebener Systemvarianten gezielt verbessern zu können. Die zu analysierenden technischen Systeme wurden so gewählt, dass sie in kurzer Zeit analysiert werden konnten und die Identifikation der Gestaltparameter trotzdem eine Herausforderung darstellte.

Für die Erhebung des Systemverständnisses wurde geprüft, ob auf etablierte Erhebungsmethoden und beobachtbare Variablen zurückgegriffen werden kann. Durch Johnson und Satchwell (1993) wurden Untersuchungen zum technischen Systemverständnis durchgeführt. Sie untersuchten den Einfluss von Funktions-Flussdiagrammen auf das technische Systemverständnis. Für die Erhebung des Systemverständnisses nutzten die Autoren Fragebögen, die Inhalte zu technischen Systemen aus einem Handbuch abfragten. Die Fragen innerhalb der Fragebögen wurden in die Kategorien *Struktur*, *Funktion* und *Verhalten* des technischen Systems eingeteilt. Es handelte sich zudem um eine Mischung von offenen und geschlossenen Fragen, die qualitativ ausgewertet wurden. Diese Erhebung wird für die Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit als ungeeignet eingestuft. Zum einen wurden Inhalte spezifisch zu den betrachteten technischen Systemen abgefragt, wodurch die Fragen selbst nicht übertragbar sind. Zum anderen erfordern offene Fragen eine inhaltsanalytische Auswertung. Durch diese Operationalisierung werden wegen der qualitativen und interpretativen Vorgehensweise gesonderte Maßnahmen für eine Objektivierung notwendig. Zusätzlich wird ein großer Aufwand in der Datenanalyse verursacht. Daher soll für die Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit eine eigene Erhebungsmethode entworfen werden, die für die quantitative Erhebung des Systemverständnisses zu den hier betrachteten technischen Systemen geeignet ist. Auf Ebene der latenten Variablen in den Kategorien Verständnis zu *Struktur*, *Funktion* und *Verhalten* sollte die Erhebungsmethode möglichst vergleichbar zu Untersuchungen mit einer Zielsetzung in Bezug zum technischen Systemverständnis gestaltet werden.

7.1.4 Fazit zum Fallbeispiel – Status der Validierung

Durch eine bestehende Klassifikation von Modellen in der Produktentwicklung (Matthiesen et al., 2019) konnte eine Vergleichbarkeit von C&C²-Modellen zu anderen qualitativen Modellen und damit deren Modellzweck hergestellt werden (siehe Strategie B, Kapitel 5.2.2.1). Durch die Kombination einer planmäßigen Vorgehensweise zur Modellbildung mit dem bereits etablierten C&C²-Modell (Matthiesen et al., 2018; Matthiesen, 2021) entstand die Konstruktionsmethode *Modellbildung mit C&C²-A*. Es konnten keine geeigneten bereits etablierten beobachtbaren Variablen

für das Systemverständnis identifiziert werden. Auf Ebene der latenten Variablen soll an der Betrachtungsweise von Johnson und Satchwell (1993) angeknüpft werden, die *Struktur*, *Funktion* und *Verhalten* als Anteile des technischen Systemverständnisses definieren. Daher werden die im Folgenden durchgeführten Studien unter Einbezug der Co-Evolution von Konstruktions- und Forschungsmethode (siehe Kapitel 6.2.3) beschrieben. Die Ergebnisse der Studien werden folglich in Bezug auf sowohl die neu eingeführte Erhebungsmethode und beobachtbare Variablen für das Systemverständnis als auch auf die Weiterentwicklung der *Modellbildung mit C&C²-A* diskutiert.

7.2 Qualitative Studie mit Fokus Anwendbarkeit

Die im Validierungs-Navigator definierten Startbedingungen für die empirische Validierung werden auf Grundlage der in Kapitel 7.1 dargelegten Situation zur Modellbildung mit C&C²-A als erfüllt angesehen. Daher wird mit einer qualitativen Studie mit Fokus auf Anwendbarkeit die empirische Validierung der Wirkung begonnen. Auf Grundlage des Detailprozesses für qualitative Studien mit Fokus auf Anwendbarkeit wurde eine Studie zur Untersuchung der Modellbildung mit C&C²-A aufgebaut und in drei Iterationen das Studiendesign und die Erhebungsmethode weiterentwickelt. Die Abfolge der Beschreibung sowie die Kapitelstruktur orientieren sich an den Teilschritten des Detailprozesses. Als Ausgangspunkt wurde die im vorhergehenden Kapitel vorgestellte Grundstruktur des Studiendesigns (siehe Abbildung 7.3) verwendet.

Dieses Kapitel basiert auf der Veröffentlichung „Supporting early stages of design method validation - an approach to assess applicability“ (Eisenmann, Grauberger & Matthiesen, 2021). Die Kapitel 7.2.1 - 7.2.3 sind in Teilen aus der Originalveröffentlichung (Materials & Methods, Results und Discussion im Original) nach Übersetzung sinngemäß übernommen und Nummerierungen sowie Begrifflichkeiten auf diese Arbeit angepasst.

7.2.1 Operationalisierung

Die hier beschriebene Studie konzentriert sich auf die Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode *Modellbildung mit C&C²-A*. Für die Untersuchung der Anwendbarkeit wurden die bereits in Kapitel 6.3.1.1 beschriebenen Variablen *Verständlichkeit*, *Benutzerfreundlichkeit* und *Korrektheit der Anwendung* genutzt. *Verständlichkeit* der Konstruktionsmethode wurde auf Grundlage von verbalen Rückmeldungen der Stu-

dienteilnehmer während der Einführung der Konstruktionsmethode und im Nachgang an die Bearbeitung der Aufgabenstellungen bewertet. Sie bezieht sich darauf, ob die Studienteilnehmer die Kernidee und die einzelnen Schritte der Konstruktionsmethode nachvollziehen konnten. *Benutzerfreundlichkeit* wurde dadurch erfasst, wie gut die Probanden während der Bearbeitung der Aufgabenstellung in der Lage waren, die einzelnen Methodenschritte durchzuführen. *Korrektheit der Anwendung* wurde durch die Vollständigkeit und formale Korrektheit der Dokumentation der Teilergebnisse aus den Methodenschritten ermittelt.

Die Wirksamkeit der Modellbildung mit C&C²-A stand nicht im Fokus dieser Untersuchung. Die Studienteilnehmer wurden jedoch zum Mehrwert der Anwendung der Konstruktionsmethode befragt und ihre Leistung in den Aufgabenstellungen im Hinblick auf die Anwendung der Modellbildung mit C&C²-A reflektiert.

7.2.1.1 Definition von Methodenschritten und Teilergebnissen

Die Schritte zur Modellbildung mit C&C²-A wurden bereits im Vorfeld der Studie definiert und sind in Abbildung 7.1 dargestellt. Schritt a) der Modellbildung legt den Zweck der Modellbildung und damit das Ziel für die weiteren Schritte fest. Der Zweck der Modellbildung wurde durch die Aufgabenstellung vorgegeben, um eine einheitliche Zielsetzung für alle Teilnehmenden zu gewährleisten. Schritt g) *Modellverifikation* beinhaltet die Prüfung, ob die gefundenen Zusammenhänge tatsächlich so auftreten, wie sie im C&C²-Modell abgebildet wurden. Da dieser Schritt in der Regel einen physischen Test oder eine Simulation des technischen Systems beinhaltet, wurde in der Studie darauf verzichtet. Deshalb sollten die Teilnehmer die Modellbildung mit C&C²-A von Schritt b) – f) durchführen. Die zu erreichenden Teilergebnisse werden sukzessive unmittelbar in dem während der Anwendung entstehenden C&C²-Modell dokumentiert: Der relevante Teil des Systems (Schritt b) wird in einem passenden Detailgrad abgebildet (Schritt c). In diesem Abbild werden die Flüsse der Systemgrößen analysiert (Schritt d) und die beteiligten Modellelemente in die Darstellung eingetragen (Schritt e) dokumentiert. Abschließend werden die funktionsrelevanten Gestaltparameter markiert oder separat notiert (Schritt f).

7.2.1.2 Hilfsmittel für die Dokumentation erstellen

Ausgehend davon, dass die einzelnen Teilergebnisse der Modellbildung mit C&C²-A direkt im Systemabbild dokumentiert werden (siehe vorangehender Abschnitt) wurde initial für die Dokumentation eine technische Zeichnung des jeweiligen Stimulus als Hilfsmittel für die Dokumentation ausgewählt. Diese Form der Dokumentation wurde in den beiden nachfolgenden Iterationen kontinuierlich weiterentwickelt (siehe Kapitel 7.2.3.1).

7.2.2 Studiendesign und -durchführung

Die Studiendurchführung erfolgte nach dem in Kapitel 7.1.3 dargestellten Ablauf. Auf der Grundlage der Ergebnisse einer Iteration wurden einzelne Elemente des Studiendesigns weiterentwickelt. Auf diese Weise wurden insgesamt drei Iterationen der Studie durchgeführt.

7.2.2.1 Teilnehmende

Wie in Kapitel 6.3.1.2 dargelegt, sind Teilnehmende für erste Studien zur Anwendbarkeit zu bevorzugen, die noch keine Erfahrungen in der Anwendung der Konstruktionsmethode haben, aber von ihren Fähigkeiten in der Lage sind, die Aufgabenstellungen zu bewältigen. Daher wurden Studierende des Maschinenbaus als Teilnehmer ausgewählt. An der ersten Iteration nahmen 4 Studierende im Grundstudium teil. An den folgenden beiden Iterationen nahmen jeweils 2 Studierende mit einem Bachelor-Abschluss in Maschinenbau teil. Die Probanden wurden als vergleichbar unerfahren für die Aufgabenstellungen innerhalb der Studie angesehen.

7.2.2.2 Aufgabenstellung

Die Fragestellung für alle Teilnehmenden sowohl in der Kontroll- als auch in der Testgruppe war eine Analyse der als Stimuli aufbereiteten technischen Systeme (vgl. Studiendesign in Abbildung 7.3). Ziel dieser Analyse war die Identifikation funktionsrelevanter Zustände sowie funktionskritischer Systembereiche und eine Einschätzung zum Verhalten des jeweiligen Systems (vgl. Abbildung 7.2). In der Testgruppenaufgabe wurden die Teilnehmenden zusätzlich angewiesen, für die Analyse die Modellbildung mit C&C²-A anzuwenden. Die Aufgabenstellung wurde innerhalb der drei Iterationen der Studie nicht verändert. Zur Erfüllung der Aufgabe stand den Probanden eine grafische Darstellung des jeweiligen Stimulus und in der Testgruppe zusätzlich Unterlagen zur Modellbildung mit C&C²-A zur Verfügung.

7.2.2.3 Einführung der Konstruktionsmethode

Ein wesentlicher Bestandteil der Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden ist ihre *Verständlichkeit*, die stark davon abhängt, wie die Konstruktionsmethode eingeführt wird. Dazu gehören textuelle, bildliche und sprachliche Komponenten der Einführung. In Iteration 1 wurde der Schwerpunkt auf eine möglichst prägnante Darstellung gelegt. Die Einführung durch einen Schulungsleiter mittels einer Präsentation mit wenigen Folien beschrieb kurz die Kernelemente des C&C²-Ansatzes und veranschaulichte die zu durchlaufenden Schritte innerhalb der Modellbildung mit C&C²-A anhand eines einfachen Beispiels. Die gesamte Einführung dauerte etwa fünf Minuten. Die Teilnehmer erhielten anschließend eine kurze Dokumentation des gezeigten Beispiels auf einem Merkblatt (siehe Abbildung A.2.1).

7.2.2.4 Datenerhebung und -analyse

Die *Datenerhebung* erfolgte durch die Aufzeichnung des gesamten Raums auf Video. Zusätzlich wurden die Teilnehmer von einem Mitglied der Studienleitung pro Teilnehmer direkt beobachtet. Außerdem wurden Notizen über das Verhalten der Teilnehmer während der Methodeneinführung und -anwendung angefertigt. Die Teilnehmer wurden gebeten, jeden Schritt auf bereitgestellten Dokumentationsmitteln (siehe Kapitel 7.2.1.2) zu dokumentieren. Alle von den Teilnehmern verwendeten Dokumentationsmittel wurden am Ende der Aufgabe eingesammelt. Abschließend wurden die Teilnehmer in der gesamten Teilnehmergruppe zur Methodenanwendung interviewt.

Die qualitative Auswertung in Bezug auf *Verständlichkeit* konzentrierte sich auf die Daten aus der direkten Beobachtung während der Methodeneinführung sowie auf die Aussagen der Teilnehmenden aus dem abschließenden Interview. Die *Benutzerfreundlichkeit* wurde hauptsächlich durch die qualitative Interpretation der Dokumentation der Teilnehmer während der Methodenanwendung und des abschließenden Interviews ermittelt. Die Bewertung der *Korrektheit der Anwendung* erfolgte durch die Analyse der von den Teilnehmern verwendeten Dokumentationsmittel.

7.2.3 Interpretation der Studienergebnisse

Die folgende Darstellung konzentriert sich auf die Ergebnisse, die eine Anpassung entweder der Forschungs- oder der Konstruktionsmethode ausgelöst haben. In den ersten beiden Iterationen wurde die Anwendbarkeit der Konstruktionsmethode als nicht ausreichend eingestuft. In der dritten Iteration konnten die Teilnehmenden zum einen durch korrekte Anwendung der Konstruktionsmethode erfolgreich C&C²-Modelle bilden (vgl. *Korrektheit der Anwendung*). Zum anderen hatten sie nach eigener Aussage im Interview verstanden, wie die Modellbildung mit C&C²-A angewandt wird (vgl. *Verständlichkeit*), und hatten keine Probleme während der Anwendung (vgl. *Benutzerfreundlichkeit*).

7.2.3.1 Evolution der Forschungsmethode

Evolution des Stimulus

Einer der beiden Stimuli (Darstellung der Kartuschenpresse) wurde aufgrund der Untersuchungsergebnisse angepasst (siehe Abbildung 7.4). In Iteration 1 wurde eine technische Zeichnung des Systems verwendet (siehe Abbildung 7.4 links). Alle Teilnehmer innerhalb Iteration 1 waren in der Lage, die kritischen Parameter des technischen Systems schnell zu identifizieren, ohne die Methode überhaupt anzu-

wenden. Das weist auf einen fehlenden Bedarf hin, der dazu führt, dass Konstruktionsmethoden nicht angewendet werden (Eisenmann & Matthiesen, 2020). Ohne eine tatsächliche Anwendung konnte keine Aussage über die Anwendbarkeit abgeleitet werden.

Für Iteration 2 wurden daher die Stimuli zu 3D-PDFs der vollständigen technischen Systeme geändert (siehe Abbildung 7.4 Mitte). Auf Grundlage dieser Anpassung mussten die Teilnehmenden selbst eine geeignete 2D-Visualisierung für die weitere Analyse finden. Dies führte in Iteration 2 dazu, dass die Teilnehmenden Schwierigkeiten hatten, in Schritt c) der Modellbildung bei der Kartuschenpresse eine geeignete Visualisierung zu finden. Dies wurde durch Beobachtung und anschließende Befragung der Teilnehmenden ersichtlich.

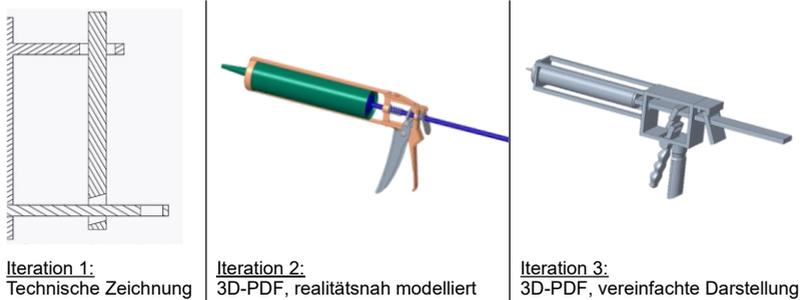


Abbildung 7.4: Entwicklung des Stimulus zum technischen System „Kartuschenpresse“ über die drei Iterationen der qualitativen Studie (Eisenmann, Grauberger & Matthiesen, 2021, S. 2828). Der ursprünglich ausgewählte Ausschnitt des Systems in Form einer technischen Zeichnung in Iteration 1 nahm zu viele Aspekte der Modellbildung vorweg. Iteration 2 des Stimulus zeigt das Gesamtsystem in Form eines 3D-PDF, was die Modellbildung zu stark erschwerte. Die in Iteration 3 genutzte, finale Version des Stimulus war deshalb ein vereinfachtes 3D-PDF, das die Modellbildung nötig machte, aber nicht unnötig erschwerte.

Daher konnten sie nicht wie vorgesehen mit der Methodenanwendung fortfahren, was zu einer geringen Leistung bei der Identifikation kritischer Gestaltparameter führte. Diese Schwierigkeit wurde auch durch die Teilnehmenden selbst im abschließenden Interview bestätigt. Die Teilnehmenden waren durch eine Erhöhung der Aufgabenschwierigkeit – ausgelöst durch den Stimulus – nicht in der Lage, die Aufgabe

zu bearbeiten (siehe auch Kapitel 6.3.1.2). Ohne eine Bearbeitung der Aufgabe konnte auch keine Wirkung der Konstruktionsmethode festgestellt werden.

Für Iteration 3 wurden die Stimuli im 3D-PDF in ihrer Geometrie vereinfacht, um eine schnellere Identifikation eines geeigneten Querschnitts zu ermöglichen (siehe Abbildung 7.4 rechts). Beide Teilnehmenden in Iteration 3 waren dadurch in der Lage, eine geeignete Visualisierung zu finden und eine Analyse unter Nutzung der Kernelemente des C&C²-A durchzuführen.

Evolution der Erhebungsmethode

Auch die Hilfsmittel für die Dokumentation der Anwendung der Konstruktionsmethode wurden über die durchgeführten Iterationen weiterentwickelt. In Iteration 1 dokumentierten die Teilnehmenden die Teilergebnisse aus den Schritten der Modellbildung direkt im Systemabbild, also in den bereitgestellten technischen Zeichnungen. Durch die Anpassung des Stimulus in Iteration 2 (siehe oben), mussten die Teilnehmenden selbst eine geeignete Visualisierung des Systems erstellen. Daher erhielten sie die Anweisung, jeden einzelnen Schritt der Methode auf bereitgestellten Blättern zu dokumentieren. Dies erschwerte die Identifikation kritischer Schritte in Iteration 2 erheblich, da aus der Dokumentation oft nicht ersichtlich war, in welchem Schritt eine Ursache für die Nichtanwendung der bereitgestellten Konstruktionsmethode auftrat. Für Iteration 3 wurde deshalb eine Vorlage in Form eines Template (siehe Abbildung A.2.3 und Abbildung A.2.4) erstellt, die für jeden Methodenschritt eine eigene Seite vorsah. Die Teilnehmer wurden gebeten, die Vorlage Schritt für Schritt auszufüllen. Auf diese Weise ermöglichte eine direkte Beobachtung der Teilnehmer, zu erkennen, wann sie einen Schritt übersprangen. Zusätzlich kann mit einem solchen Template auch ohne direkte Beobachtung identifiziert werden, in welchem Schritt Probleme in der Anwendung auftreten.

7.2.3.2 Evolution der Konstruktionsmethode

Im Hinblick auf die drei erfassten Variablen zur Anwendbarkeit konnte vor allem die Einführung der Konstruktionsmethode weiterentwickelt und kritische Aspekte für die weitere Validierung aufgedeckt werden:

Verständlichkeit. Durch die Befragung der Teilnehmenden am Ende jeder Iteration konnte zwischen mangelndem Verständnis und anderen Ursachen für eine Nichtanwendung der Konstruktionsmethode unterschieden werden. Darüber hinaus konnten die Teilnehmenden durch die Unterteilung in explizite Methodenschritte genauer beschreiben, welchen Teil sie nicht verstanden hatten. Auf dieser Grundlage konnte die Einführung der Konstruktionsmethode modifiziert werden. Die Teilnehmenden waren sich dabei unsicher, wie die Gestaltfunktionselemente in Schritt e)

im Systemabbild dargestellt werden sollen. Um eine bessere Verständlichkeit zu erreichen, wurde eine geführte Anwendung der Modellbildung mit C&C²-A einbezogen. Es wurde eine Beispielaufgabe zu einem dritten technischen System hinzugefügt, die die Teilnehmenden unter Anleitung der Studienleitung bearbeiteten. Auf diese Weise konnten die Teilnehmenden die Methode einmal mit Unterstützung anwenden, bevor sie sie eigenständig nutzten.

Benutzerfreundlichkeit. Die Beobachtung der Teilnehmenden während der Studien machte ihre Probleme bei der Anwendung sichtbar. Durch die Unterteilung der Methode in einzelne Schritte konnten diese Probleme eingegrenzt werden. In einem Fall konnten die Probleme auf einen einzigen, kritischen Methodenschritt zurückgeführt werden. Die Identifikation dieses kritischen Schrittes führte zu Anpassungen in den Dokumentationsmitteln und im Stimulus (siehe Kapitel 7.2.3.1). Das Finden einer geeigneten Visualisierung des technischen Systems (Schritt c)) stellt einen kritischen Schritt bei der Modellbildung mit C&C²-A dar, was in der weiteren Validierung berücksichtigt werden sollte.

Korrektheit der Anwendung. Durch die Erstellung eines Methoden-Templates konnte für jeden Methodenschritt untersucht werden, wie die Teilnehmenden die Konstruktionsmethode tatsächlich anwendeten. Die *Korrektheit der Anwendung* wird durch die vorhergehenden Faktoren *Verständlichkeit* und *Benutzerfreundlichkeit* sowie durch den Bedarf der Teilnehmenden, die Methode tatsächlich anzuwenden, beeinflusst. Zudem scheint die *Korrektheit der Anwendung* geeignet, um die Anwendbarkeit von Konstruktionsmethoden in weiteren Validierungsschritten übergeordnet zu bewerten, wo die quantitative Untersuchung und Auswertung im Vordergrund steht.

Durch die Anwendung des *Detailprozesses für qualitative Studien* in drei Iterationen konnten für die weitere Validierung relevante Aspekte hinsichtlich der Anwendbarkeit der Modellbildung mit C&C²-A identifiziert werden. Durch die Aufteilung der Konstruktionsmethode in konkrete Schritte konnte in der Beobachtung der Teilnehmenden erfasst werden, in welchen Schritten diese ins Stocken kamen. Rückfragen mit Bezug zu diesen Situationen im Abschlussinterview ermöglichte so die Identifikation eines kritischen Schrittes. Durch die Anpassung der Methodenbeschreibung und -einführung waren die Teilnehmer in Iteration 3 in der Lage, C&C²-Modelle selbst zu erstellen, indem sie die vorgegebenen Methodenschritte korrekt befolgten. Die Anwendbarkeit der Modellbildung mit C&C²-A wurde daher als ausreichend eingeschätzt, um weitere Experimente mit einer größeren Anzahl von Teilnehmern durchzuführen.

7.2.4 Diskussion zur Eignung des Referenzprozesses

Die in der quantitativen Studie durch Anwendung des Detailprozesses erzielten Beiträge zur Studienqualität und zur Vergleichbarkeit sind in Abbildung 7.5 in Bezug auf Untersuchungsinhalte und Vorgehensweise zusammenfassend dargestellt. Sie werden im Folgenden näher erörtert.

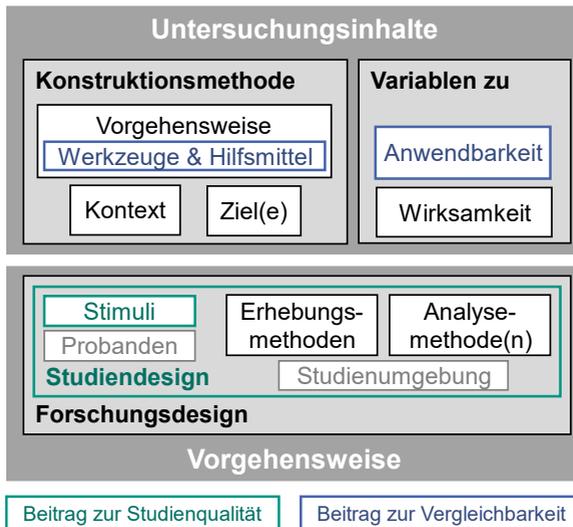


Abbildung 7.5: Visualisierung der Beiträge aus der Anwendung des Detailprozesses für qualitative Studien in Bezug auf die Untersuchungsinhalte und Vorgehensweise. Wo Beiträge zur Studienqualität geleistet werden konnten ist in grün hervorgehoben, Beiträge zur Vergleichbarkeit in blau.

7.2.4.1 Beitrag zur Studienqualität

Durch den Fokus auf eine qualitative Untersuchung der Anwendbarkeit konnten in der in diesem Kapitel vorgestellten Studie wichtige Erkenntnisse für die weitere Validierung gewonnen werden. So konnten die Einführung der Konstruktionsmethode sowie das Studiendesign vor der quantitativen Untersuchung entsprechend optimiert werden, um eine tatsächliche Anwendung der Konstruktionsmethode (siehe

Kriterium 5: interne Validität) zu begünstigen. Auf diese Weise können auftretende Wirkungen in der nachfolgenden quantitativen Untersuchung wahrscheinlicher einer vollständigen Anwendung der Konstruktionsmethode zugeordnet werden, was die Grundlage für eine valide Erhebung der Wirksamkeit bildet. Daraus entsteht ein Beitrag zur Qualität des Studiendesigns (vgl. Abbildung 7.5).

Die Wirksamkeit einer Konstruktionsmethode kann nur dann entstehen, wenn die Probanden auch einen Bedarf für eine Anwendung der Methode haben. Daher sollten die Aufgabenstellungen für die Probanden ausreichend schwierig sein, sie aber gleichzeitig nicht überfordern. Auswirkungen des Stimulus (vgl. Abbildung 7.5) auf die Aufgabenschwierigkeit sind in der hier vorgestellten qualitativen Studie deutlich geworden. Ohne die qualitative Untersuchung wäre eine Absicherung in Bezug auf eine Eignung der Aufgabenstellungen (Kriterium 3) nicht möglich gewesen.

7.2.4.2 Unterstützung im Aufbau von vergleichbaren Studien

In Bezug auf die verwendeten latenten Variablen kann die Anwendbarkeit der Modellbildung mit C&C²-A auf qualitativer Ebene mit Untersuchungen zu anderen Konstruktionsmethoden verglichen werden, die diese latenten Variablen ebenfalls anwenden. Durch die Bereitstellung der Variablen im Referenzprozess werden diese für nachfolgende Studien zu anderen Konstruktionsmethoden verfügbar gemacht. Für eine direkte Vergleichbarkeit der erhobenen beobachtbaren Variablen fehlen auch nach der qualitativen Studie Kennwerte für die untersuchten latenten Variablen. Zum jetzigen Zeitpunkt besteht zumindest eine inhaltliche Vergleichbarkeit auf Ebene der latenten Variablen (vgl. Abbildung 7.5) zu den Studien von Motte et al. (2018) und Kroll und Weisbrod (2020), welche als Grundlage für die Definition der Variablen in dieser Arbeit herangezogen wurden.

Geschaffene Mittel zur Dokumentation in Form eines Methoden-Templates können für weitere Validierungsschritte genutzt werden. Das im vorliegenden Fall erarbeitete Template ist unabhängig vom untersuchten System und bildet daher ein vergleichbares Hilfsmittel (vgl. Abbildung 7.5), das für andere Konstruktionsmethoden eingesetzt werden kann, die die beschriebenen Schritte zur Modellbildung verwenden. Im vorliegenden Fallbeispiel bieten sich Potentiale, das Template für die Dokumentation und Datenerhebung mit anderen Modellen zu verwenden, da die Schritte zur Modellbildung auf einige andere Modelle übertragbar sind (siehe Kapitel 7.1.1). Unterschiede ergeben sich lediglich in einem Schritt, der sich auf Bausteine des verwendeten Modells bezieht. Diese Vergleichbarkeit zu anderen Modellen in der Konstruktion wurde durch die Einbettung in den Prozess der Methodvalidierung (Kapitel 6.2.1.1) und die Anwendung von Strategie B *Nutzung etablierter Modelle und Werkzeuge* begünstigt.

7.3 Quantitative Studie mit Fokus Wirksamkeit

Aufbauend auf den Ergebnissen der qualitativen Studie mit Fokus auf Anwendbarkeit wurde gefolgert, dass die Anwendbarkeit der Modellbildung mit C&C²-A als ausreichend für eine Fortführung der Methodenvvalidierung in einer quantitativen Untersuchung der Wirksamkeit angesehen werden kann. Wie bereits in der Beschreibung zur qualitativen Studie orientiert sich die Gliederung der Beschreibung am Detailprozess (Kapitel 6.3.2) innerhalb des Referenzprozesses. Der grundlegende Aufbau der Studie entspricht der Beschreibung in Kapitel 7.1.3 (Illustration in Abbildung 7.3).

Dieses Kapitel basiert auf der Veröffentlichung „Investigating qualitative modelling in design - experimental method validation at the Contact and Channel Approach“³ (Grauberger et al., 2022). Die Kapitel 7.3.1 - 7.3.3 sind in Teilen aus der Originalveröffentlichung (Materials & Methods, Results und Discussion im Original) sinngemäß übernommen und Nummerierungen sowie Begrifflichkeiten auf diese Arbeit angepasst.

7.3.1 Operationalisierung

Um die Korrektheit der Anwendung der Modellbildung mit C&C²-A auch in der quantitativen Untersuchung prüfen zu können, kommt das im Rahmen der qualitativen Studie eigens entwickelte Methodentemplate zum Einsatz. Durch die Dokumentation der Teilergebnisse jedes Methodenschritts findet auf diese Weise innerhalb der quantitativen Studie eine qualitative Überprüfung der Anwendbarkeit statt, auch wenn diese nicht im Fokus der Untersuchung steht. Im Rahmen der Untersuchung werden die Teilnehmenden durch das Template dazu angeregt, alle Schritte der Konstruktionsmethode auch tatsächlich durchzuführen. In nachfolgenden Untersuchungen sollte überprüft werden, ob die Durchführung der Schritte auch ohne diesen Zwang durch ein Template erfolgt.

7.3.1.1 Methodenziele und beobachtbare Variablen

Die Operationalisierung der Wirksamkeit der Modellbildung mit C&C²-A in Bezug auf das Systemverständnis wurde im Hinblick auf das zur Einbettung gebildete *Impact*

³ Es besteht eine geteilte Erstautorenschaft für diese Veröffentlichung mit Patric Grauberger. Maßgebliche Beiträge des Autors dieser Arbeit an der Veröffentlichung liegen vor allem in der Konzeption des Studiendesigns und der Operationalisierung der Erfolgskriterien sowie der Diskussion der Ergebnisse.

Model (siehe Abbildung 7.2) auf zwei Detaillierungsgraden festgelegt: Auf *Systemebene* und auf *Detailebene*.

Das Systemverständnis auf *Systemebene* wird erfasst, indem die Teilnehmenden eine Einschätzung zum Verhalten verschiedener konstruktiver Ausführungen eines technischen Systems treffen. Auf diese Weise wird erfasst, ob die Teilnehmenden verstanden haben, wie die konstruktiven Details des Systems mit dessen Verhalten zusammenhängen (siehe auch Abbildung 7.2) und ob dieses Verhalten zur Erfüllung der Funktion beiträgt. Durch eine Einschätzung mehrerer Varianten kann eine Punktzahl (oder eine Prozentzahl) für das Systemverständnis auf *Systemebene* ermittelt werden, je nachdem ob das Verhalten der gezeigten konstruktiven Ausführungen korrekt eingeschätzt wird oder nicht.

Beim Systemverständnis auf *Detailebene* wird unterschieden in die Identifikation funktionsrelevanter Zustände, die das System einnimmt, und in die Identifikation funktionskritischer Systembereiche. Über eine Auswahl von relevanten Zuständen aus möglichen Zuständen, die das System einnimmt wird geprüft, ob die Teilnehmenden verstanden haben, welche Zustände maßgeblich zur Funktionserfüllung des Systems beitragen. Durch eine Auswahl von Systembereichen kann außerdem geprüft werden, ob die Teilnehmer unterscheiden können, welche Teile des Systems kritisch für die Funktionserfüllung sind.

Bei der Definition dieser beobachtbaren Variablen wurde darauf geachtet, dass sie auch unabhängig von qualitativen Modellen und der Modellbildung in der Gestaltung zur Erfassung des technischen Systemverständnisses eingesetzt werden können (siehe Strategie A: einheitliche Methodenziele und Variablen). Auf diese Weise können diese Variablen für die Untersuchung von Konstruktionsmethoden genutzt werden, die das technische Systemverständnis adressieren.

7.3.1.2 Quantitative Erhebungsmethode

Zur Erhebung des Systemverständnisses auf *System-* und *Detailebene* wurden die Aufgabenstellungen in der Lernplattform ILIAS des KIT implementiert. Auf diese Weise konnten die Antworten der Teilnehmenden digital und pseudonymisiert erfasst werden.

Für die Erhebung des Systemverständnisses auf *Systemebene* wurden unterschiedliche konstruktive Varianten des jeweiligen Systems erzeugt, die nacheinander in Form eines 3D-PDF für eine Analyse zur Verfügung gestellt wurden. Für jede der Varianten wurde dann mittels Single-Choice eine Abfrage zum Verhalten des Systems erstellt. Die vier zur Auswahl stehenden Möglichkeiten für die Bewertung

des Verhaltens für das technische System „Rasthaken“ sind in Abbildung 7.6 dargestellt. Für jede Single-Choice Zuordnung kann auf diese Weise eine Bewertung in „korrekt“ oder „falsch“ erfolgen, was die Ermittlung einer Punktzahl ermöglicht. Die maximale Punktzahl entspricht damit der Anzahl zur Verfügung gestellter konstruktiver Varianten des zu analysierenden technischen Systems.

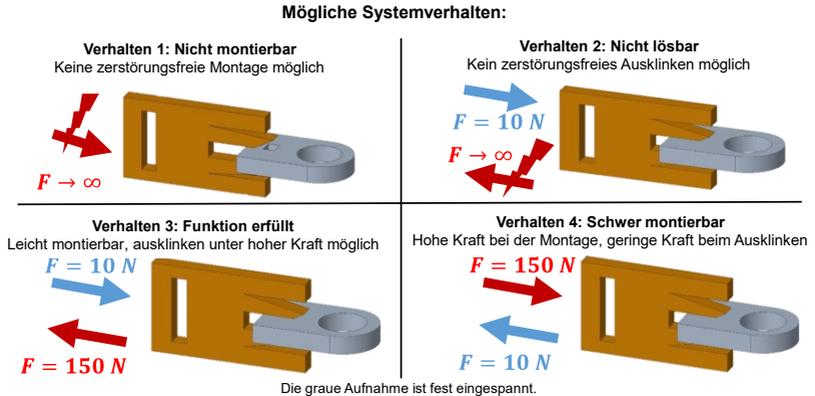


Abbildung 7.6: Auswahlmöglichkeiten für die Single-Choice Bewertung des Systemverhaltens des Stimulus „Rasthaken“. Die Darstellung ist analog dazu, wie sie den Teilnehmern in ILIAS präsentiert wurde. Die einzelnen Verhaltensvarianten konnten per Checkbox ausgewählt werden. Für den Stimulus „Kartuschenpresse“ wurden vier vergleichbare Systemverhalten definiert und analog dargestellt (vgl. Grauberger et al., 2022).

Für das Systemverständnis auf der *Detailebene* in Bezug auf die Zustände des technischen Systems wurde für beide Stimuli jeweils eine Multiple-Choice Frage entworfen, die die Auswahl verschiedener vereinfacht dargestellter Zustände des Systems ermöglicht. Die zur Auswahl stehenden Zustände für den Stimulus „Rasthaken“ sind in Abbildung 7.7 dargestellt. Für die Auswertung werden die Zustände in relevant und nicht relevant eingeteilt. Die erzielbaren Ergebnisse können so in drei Kategorien eingeteilt werden: (1) Nur die relevanten Zustände werden ausgewählt (korrekt), (2) relevante und nicht relevante Zustände werden ausgewählt (Fokus zu weit) und (3) relevante Zustände fehlen in der Auswahl.

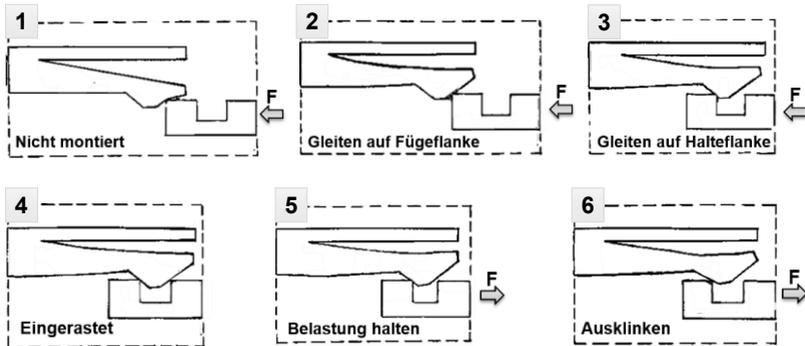


Abbildung 7.7: Auswahlmöglichkeiten für die funktionsrelevanten Zustände des Stimulus „Rasthaken“. Die Anordnung der Zustände orientiert sich an der Reihenfolge wie sie auch in der Nutzung eines Rasthakens auftreten. Zur Auswahl der Zustände wurden in ILIAS Checkboxes verwendet.

Für die Erhebung zu funktionskritischen Bereichen der Gestalt des technischen Systems in Bezug zum Systemverständnis auf der *Detailebene* wurde eine Imagemap eingesetzt (siehe Abbildung 7.8), die für eine Auswahl vordefinierte Bereiche enthielt, die für die Teilnehmenden aber nicht sichtbar in ihren Abgrenzungen waren. Die Bereiche werden unterschieden in funktionskritische Bereiche, an der Funktionserfüllung beteiligte Bereiche und Reststruktur. Bei den Antworten wird unterschieden, ob nur die kritischen Bereiche ausgewählt wurden (richtig), ob auch funktionsbeteiligte Bereiche ausgewählt wurden (Fokus zu weit), ob funktionskritische Bereiche fehlen oder ob auch Reststruktur ausgewählt wurde. Dadurch ergeben sich vier Kategorien.

Um Lerneffekte in den Aufgaben zur Erhebung des Systemverständnisses zu minimieren, wurde auf ein Feedback zur Lösung der Teilnehmenden verzichtet. Andernfalls könnten Teilnehmende mit dem Wissen zu ihrer Leistung in der zuerst durchgeführten Kontrollgruppenaufgabe ihr Vorgehen in der Analyse reflektieren und selbstständig weiterentwickeln. Dieser Lerneffekt ist jedoch unerwünscht, da er im gewählten Studiendesign die Wirkungen der eingeführten Konstruktionsmethode überlagern würde.

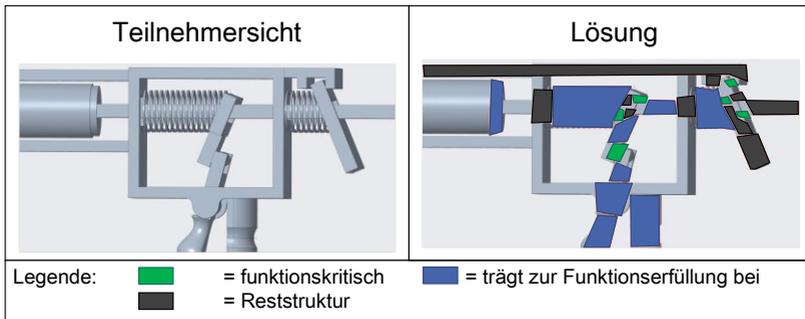


Abbildung 7.8: Imapemap zur Auswahl funktionsrelevanter Bereiche des Stimulus zum technischen System „Kartuschenpresse“. Links ist die Imapemap aus Sicht der Teilnehmenden dargestellt, rechts die auswählbaren Bereiche im Systemabbild und deren korrekte Zuordnung. Für die Studie wurde der zuvor in der qualitativen Studie weiterentwickelte Stimulus in Form einer vereinfachten 3D-Darstellung des Systems verwendet.

7.3.2 Studiendesign und -durchführung

Für eine höhere Durchführungsobjektivität wurden die Aufgaben und Input-Phasen der Studie als Online-Kurs auf der ILIAS-Plattform des KIT durchgeführt. Für die Koordination, organisatorische Rückfragen und die gemeinsame Modellbildung nach der Schulung wurde Microsoft Teams verwendet. Die Teilnehmenden wurden zufällig in zwei gleich große Gruppen A und B eingeteilt, die direkt verschiedenen Kanälen in Microsoft Teams zugeteilt wurden, um eine Absprache der unterschiedlichen Gruppen zu verhindern. Insgesamt wurde an zwei Terminen ein jeweils zwei-stündiger Durchgang der Studie mit Teilnehmenden aus unterschiedlichen Universitäten durchgeführt.

7.3.2.1 Teilnehmende

Die Studie wurde mit 36 Teilnehmern ohne Expertenwissen zum C&C²-Ansatz in zwei Durchgängen durchgeführt. Durchgang 1 wurde mit 24 Studierenden der Master-Veranstaltung „Gerätetechnik“ am IPEK - Institut für Produktentwicklung am KIT durchgeführt. Durchgang 2 wurde mit 12 Forschungsassistenten des Instituts für

Produktentwicklung und Maschinenelemente der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Da die Gruppen der Teilnehmenden in beiden Durchgängen Kenntnisse in den Grundlagen zu qualitativen Modellen, jedoch keine expliziten Erfahrungen zur Modellbildung mit C&C²-A aufweisen konnten, wurden die Gruppen als vergleichbar im Hinblick auf Vorwissen eingestuft.

7.3.2.2 Aufgabenstellung

Für beide Stimuli lautete die übergeordnete Aufgabe, das technische System zu analysieren, um die Einflüsse der Gestalt auf deren Funktionsweise zu verstehen. Die folgenden Teilaufgaben orientierten sich an den im Zuge der Implementierung der Erhebungsmethode erstellten Abfragen: Zuerst eine Single-Choice Aufgabe, in der sechs Varianten des Systems ihr entsprechendes Systemverhalten zugeordnet werden sollte (vgl. Abbildung 7.6). Es folgten die zuvor beschriebene Multiple-Choice Aufgabe zu Systemzuständen (vgl. Abbildung 7.7) und die bereits dargestellte Imagemap zur Auswahl funktionskritischer Systembereiche (vgl. Abbildung 7.8). Die Aufgabenstellung nach der Methodenschulung und geführten Anwendung wurde ergänzt, da nun für die Analyse die Modellbildung mit C&C²-A angewandt werden sollte. Die Teilnehmenden bekamen den Modellzweck vorgegeben und sollten anschließend die Schritte b) - f) der Modellbildung mit C&C²-A durchführen.

7.3.2.3 Einführung der Konstruktionsmethode

Im Nachgang zur qualitativen Studie wurden bestehende Schulungen zur Einführung der Modellbildung mit C&C²-A im Hinblick auf bildungswissenschaftliche Aspekte analysiert und weiterentwickelt (Grauberger et al., 2021). Das Ergebnis dieser Weiterentwicklung waren drei unterschiedliche Schulungen für (1) Grundlagen in einer Basis-Schulung, (2) erweiterte Anwendung inklusive verschiedener Techniken zur Analyse sowie (3) für die Synthese in der Gestaltung. Für die quantitative Studie wurde die Basis-Schulung als geeignet ausgewählt, da sie in kurzer Zeit (ca. 30 Minuten) die grundlegenden Aspekte der Modellbildung mit C&C²-A adressiert, was für eine Analyse der verwendeten Stimuli als ausreichend eingestuft wurde.

Die theoretische Einführung in die Modellbildung mit C&C²-A und Illustration der Methode an einem Anwendungsbeispiel wurde per Video⁴ durchgeführt. Auf diese Weise bekamen alle Teilnehmenden eine identische Schulung, deren Tempo sie individuell bestimmen konnten. Da in der qualitativen Studie der Schritt *c) System bei der Funktionserfüllung abbilden* als besonders kritisch für die Wirksamkeit der Modellbildung eingestuft wurde, wurde im Einführungsvideo explizit darauf hinge-

⁴ Das Schulungsvideo ist verfügbar unter https://youtu.be/b6FE_hOnp8M.

wiesen, dass es sich um einen besonders relevanten Schritt innerhalb der Modellbildung handelt. Es folgte eine schrittweise Modellbildung an einem weiteren Beispiel, die die Teilnehmer in der ILIAS-Umgebung in ihrem individuellen Tempo durchführen konnten. Nach jedem der Schritte erfolgte eine Abfrage zum Teilergebnis dieses Schritts und die Teilnehmenden konnten ein automatisiertes Feedback zu ihrem Teilergebnis anfordern, um ihren Modellbildungsprozess zu hinterfragen und gegebenenfalls zu korrigieren. Zum Abschluss der Einführung bekamen alle Teilnehmenden ein kurzes Merkblatt (siehe Abbildung A.2.1 und Abbildung A.2.2) mit einer Übersicht der Kernelemente des C&C²-A und der Schritte zur Modellbildung zur Verfügung gestellt.

7.3.2.4 Datenerhebung und -analyse

Datenerhebung

Die Daten wurden in zwei Durchgängen an unterschiedlichen Tagen mit unterschiedlichen Gruppen von Teilnehmenden erhoben. Durch die Implementierung in ILIAS konnten zum Systemverständnis auf System- und auf Detailebene die Antworten der Teilnehmenden digital erhoben und nach der Durchführung exportiert werden.

Zusätzlich sollten die Teilnehmenden ihre im Methodentemplate physisch erstellten Skizzen zur Modellbildung während der Schulung und der Testgruppenaufgabe digitalisieren und anschließend auf ILIAS hochladen.

Datenanalyse

Aus den exportierten Rohdaten wurden die Variablen für das Systemverständnis auf System- und Detailebene ermittelt. Auf Systemebene wurde die Anzahl an korrekt zugeordnetem Systemverhalten zur gezeigten Systemvariante gezählt. Dadurch ergab sich eine Punktzahl von null bis sechs. Für die Ermittlung des Systemverständnisses auf Detailebene wurden die Antworten der Teilnehmer wie in Kapitel 7.3.1 beschrieben in drei bzw. vier Kategorien eingeteilt.

Anschließend wurden die ermittelten Variablen unter Zuhilfenahme verschiedener statistischer Tests im Hinblick auf die Untersuchungsziele analysiert. Eine Übersicht der durchgeführten Tests (siehe Tabelle A.2.2) inklusive Beschreibung zur Auswahl ist im Anhang dieser Arbeit zu finden.

7.3.3 Interpretation der Studienergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der quantitativen Studie mit Fokus auf die Wirksamkeit in knapper Form präsentiert, um anschließend Folgerungen für die Evolution von Forschungs- und Konstruktionsmethode abzuleiten. Vor der Auswertung in Bezug auf die Auswirkungen der Modellbildung mit C&C²-A auf das Systemverständnis konnten die Gruppenzuordnung der Teilnehmenden und der Studiendurchgang als weitere Einflüsse ausgeschlossen werden.⁵

Die Ergebnisse zur Auswirkung der Modellbildung mit C&C²-A sind in Abbildung 7.9 dargestellt. Beim Vergleich von Kontroll- und Testgruppe zeigt der Wilcoxon-Test einen signifikanten Unterschied mit einem mittleren Effekt ($r = 0,375$). Daraus kann ein Zuwachs an Systemverständnis auf der Systemebene im Vergleich zur intuitiven Modellbildung in der Kontrollgruppe interpretiert werden.

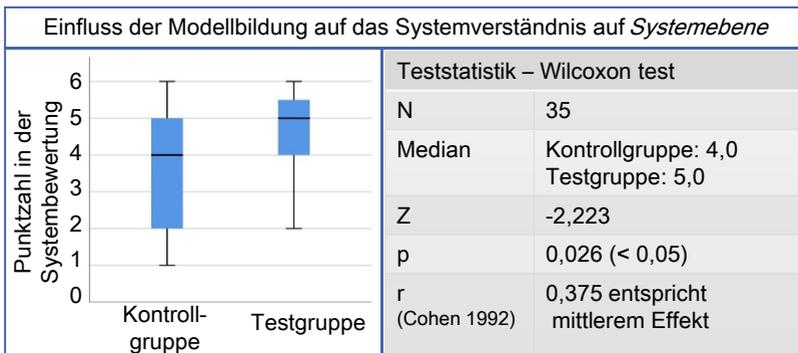


Abbildung 7.9: Ergebnisse der statistischen Analyse zum Einfluss der Modellbildung mit C&C²-A auf das Systemverständnis auf Systemebene. Die Analyse ergibt einen signifikanten Unterschied zwischen Test- und Kontrollgruppe mit einem mittleren Effekt nach Cohen (1992) in positiver Richtung. Daraus lässt sich ableiten, dass die Modellbildung mit C&C²-A eine positive Wirkung auf das Systemverständnis auf Systemebene hat.

⁵ Die zugehörigen Diagramme zur Prüfung der Einflüsse von Gruppenzuordnung und Studiendurchgang sind in Abbildung A.2.5 im Anhang aufgeführt.

In der statistischen Analyse zum Systemverständnis auf Detailebene konnte jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen Test- und Kontrollgruppe ermittelt werden (siehe Tabelle 7.1).⁶

Tabelle 7.1: Übersicht der Teststatistik zur Prüfung des Einflusses der Modellbildung mit C&C²-A auf das Systemverständnis auf der Detailebene. Für funktionskritische Bereiche und funktionsrelevante Zustände wurde ein exakter Test nach Fischer angewandt.

Detailebene	Funktionskritische Bereiche		Funktionsrelevante Zustände	
	Rasthaken	Kartuschen- presse	Rasthaken	Kartuschen- presse
Fischer exakt	5,590	2,824	0,527	2,392
p	0,082	0,241	0,856	0,301
r (Cohen, 1992)	-	-	-	-

Durch die quantitative Studie konnten also keine statistisch signifikant auftretenden Auswirkungen auf das Systemverständnis auf Detailebene gefunden werden. Daher kann gefolgert werden, dass die Wirkzusammenhänge im Aufbau von Systemverständnis anders geartet sind, als bisher angenommen. Vor den durchgeführten Validierungsstudien bestand die Annahme, dass das Systemverständnis auf Systemebene, das zu einer Einschätzung des Systemverhaltens befähigt, auf der Kenntnis zu Zuständen und Systemparametern aufbaut (siehe *Impact Model* in Abbildung 7.2). Die Ergebnisse der quantitativen Studie legen jedoch nahe, dass die Fähigkeit zur Einschätzung des Systemverhaltens auch ohne einen Zuwachs der Kenntnisse auf Detailebene entstehen kann. Eine mögliche Folgerung ist, dass das Systemverständnis auf Detail- und Systemebene unabhängig voneinander entstehen. Ausgehend von dieser Folgerung kann das *Impact Model* zum Zusammenhang der Modellbildung mit C&C²-A mit dem Systemverständnis wie in Abbildung 7.10 dargestellt angepasst werden:

⁶ Eine detailliertere Aufschlüsselung der geprüften Kategorien ist in Grauberger et al. (2022) nachzulesen.

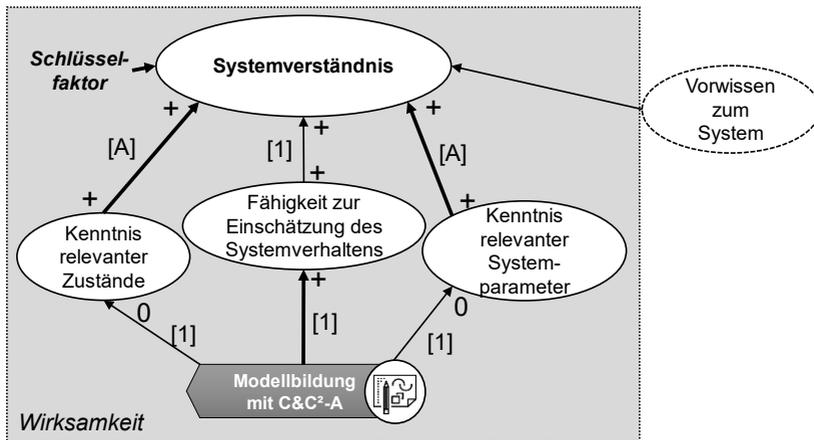


Abbildung 7.10: Auf Grundlage der Studienergebnisse überarbeitetes *Impact Model* zu den Wirkungen der Modellbildung mit C&C²-A auf das Systemverständnis. Die durch die quantitative Studie (Grauberger et al., 2022) mit Fokus Wirksamkeit gefolgerten Zusammenhänge sind mit [1] gekennzeichnet. Abweichend zu klassischen *Impact Models* sind die erhobenen Variablen als Anteile des Systemverständnisses zu sehen und nicht als Einflussfaktoren. Das Systemverständnis bildet in diesem Fall einen Schlüsselfaktor, der als latentes Konstrukt nicht direkt erfasst werden kann.

7.3.3.1 Evolution der Forschungsmethode

In der quantitativen Studie mit Fokus Wirksamkeit sind keine Wirkungen auf das Systemverständnis auf Detailebene sichtbar geworden. Das kann auf verschiedene mögliche Ursachen mit Bezug zu der entwickelten Erhebungsmethode zurückgeführt werden:

- Die Wirkung ist zu klein, um sie mit der durch die Anzahl an Teilnehmenden limitierten Anzahl an Datenpunkten und der erreichten Genauigkeit der Erhebungsmethode zu erfassen.
- Die Operationalisierung und die zugehörige Erhebungsmethode erfassen nicht die latente Variable „Systemverständnis auf Detailebene“.
- Die Konstruktionsmethode hat keinen Einfluss auf das Systemverständnis auf Detailebene (siehe Kapitel 7.3.3.2).

Maßnahmen zur Behebung der Ursachen beinhalten also die Erarbeitung einer alternativen Erhebungsmethode oder die Weiterentwicklung des bestehenden Verfahrens in Richtung einer höheren Auflösung der erfassten Daten.

Weitere Ergebnisse der statistischen Analyse (siehe Abbildung A.2.6 im Anhang) deuten außerdem darauf hin, dass einer der Stimuli weiterentwickelt werden kann, um größere Effekte zu erzielen. Beim Stimulus „Rasthaken“ waren die Teilnehmenden häufig bereits in der Kontrollgruppenaufgabe bei hohen Punktzahlen in Bezug auf das Systemverständnis auf Systemebene. Durch den geringen Unterschied haben diese Ergebnisse einen geringen diagnostischen Wert in Bezug auf die Wirksamkeit der Konstruktionsmethode. Weniger erfahrene Teilnehmende oder ein weiterer Stimulus, der eine höhere Schwierigkeit der Aufgabenstellung nach sich zieht, könnten einen höheren Bedarf an methodischer Unterstützung auslösen. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass die Wirkungen der Modellbildung mit C&C²-A besser sichtbar werden.

7.3.3.2 Evolution der Konstruktionsmethode

In Bezug auf die Konstruktionsmethode ist eine mögliche Ursache für einen sichtbar gewordenen Effekt auf das Systemverständnis auf Detailebene, dass die Modellbildung mit C&C²-A prinzipiell darauf keine Wirkung ausübt. Dadurch dass die Modellbildung mit C&C²-A durch Experten bereits mehrfach in Entwicklungsprojekten (Grauberger et al., 2020) sowie Workshops zur Problemlösung (Nelius et al., 2021) einen Mehrwert in der Identifikation funktionsrelevanter Zustände und funktionskritischer Parameter erzeugt hat, wird dieser Fall als unrealistisch angesehen. Allerdings stellt sich die Frage, ob die Teilnehmenden in dieser Studie durch die Basis-Schulung der Konstruktionsmethode ausreichend Expertise in deren Anwendung aufbauen konnten, um eine Wirkung zu erzielen. In diesem Fall sollte die Einführung der Konstruktionsmethode überarbeitet werden.

Eine genauere Untersuchung der Schritte und Erarbeitung weiterer Unterstützung in der Anwendung der Konstruktionsmethode scheint notwendig zu sein. Dazu können auch Erkenntnisse zu den zum C&C²-Modell vergleichbaren Modellen (siehe Kapitel 7.1.1) herangezogen werden. Bevor die Konstruktionsmethode weiterentwickelt wird, muss jedoch eine Evolution der Erhebungsmethode erfolgen, um zu klären, welche Effekte tatsächlich auftreten und wie sich diese gegenseitig beeinflussen.

Die quantitative Studie hat Belege dafür geliefert, dass die Modellbildung mit C&C²-A einen positiven Einfluss auf das Systemverständnis auf Systemebene ausübt. Da die zugrundeliegenden Annahmen nicht ausreichend geprüft werden konnten, sollte

die Konstruktionsmethode allerdings in weiteren experimentellen Studien mit alternativen, weiterentwickelten Erhebungsmethoden und zugehörigen Variablen untersucht werden.

7.3.4 Diskussion zur Eignung des Referenzprozesses

Die in der quantitativen Studie durch Anwendung des Detailprozesses erzielten Beiträge zu Studienqualität und zur Vergleichbarkeit sind in Abbildung 7.11 in Bezug auf Untersuchungsinhalte und Vorgehensweise zusammenfassend dargestellt. Sie werden im Folgenden näher erörtert.



Abbildung 7.11: Visualisierung der Beiträge aus der Anwendung des Detailprozesses für quantitative Studien in Bezug auf die Untersuchungsinhalte und Vorgehensweise. Wo Beiträge zur Studienqualität geleistet werden konnten ist in grün hervorgehoben, Beiträge zur Vergleichbarkeit in blau.

7.3.4.1 Beitrag zur Studienqualität

Durch Berücksichtigung von verschiedenen im Validierungs-Navigator beschriebenen Hinweisen und integrierten Kontrolltechniken konnte die Studienqualität in der quantitativen Studie in Bezug auf die Gütekriterien Objektivität, Reliabilität und Validität positiv beeinflusst werden.

In Bezug zur *Objektivität* wurden in der quantitativen Studie die Datenerhebung, Datenauswertung und Methodeneinführung digitalisiert und dadurch für alle Teilnehmer identisch durchgeführt. Auf diese Weise konnten Durchführungs- und Auswertungsobjektivität in Bezug zu den angewendeten Forschungsmethoden (vgl. Abbildung 7.11) durch Konstanzhaltung adressiert sowie die Störvariable Versuchsleitermerkmale eliminiert werden (vgl. Kapitel 6.3.2.1). Außerdem wurde die Studie mit verschiedenen Gruppen von Teilnehmenden durchgeführt, um eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der untersuchten Gruppe zu reduzieren. Hieraus ergab sich zusätzlich ein positiver Einfluss auf die *Reliabilität*, indem für Durchführungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit vergleichbaren Teilnehmergruppen auch vergleichbare Ergebnisse erzielt werden konnten. Durch den Einsatz verschiedener Stimuli und homogener Teilnehmergruppen konnten Einflüsse durch die Aufgabenstellung und das Vorwissen der Teilnehmer reduziert werden, was zur *Validität* der Ergebnisse beiträgt.

Durch die frühzeitige Festlegung der zu erhebenden Faktoren im *Impact Model* und dem Abgleich der tatsächlich auftretenden Wirkungen konnte die Sichtweise auf das Systemverständnis hinterfragt werden. Daraus resultierend konnte geschlossen werden, dass die Erhebungsmethode für das Systemverständnis auf Detailebene weiterentwickelt werden muss. Zusätzlich konnte die Erhebungsmethode für das Systemverständnis auf Systemebene als geeignet eingestuft werden. Beide Aspekte helfen dabei, die Studienqualität in Bezug auf die Erhebungsmethoden einzuschätzen und zu verbessern (vgl. Abbildung 7.11).

Für die quantitative Studie insgesamt haben die zuvor durchgeführten Forschungsaktivitäten innerhalb des Referenzprozesses einen Beitrag zur Studienqualität geleistet. So konnte die mit Hilfe der qualitativen Studie erreichte Anwendbarkeit der Modellbildung mit C&C²-A und der Dokumentation im Template zur tatsächlichen Anwendung beitragen. Daher konnte die Methodenanwendung in der quantitativen Studie durch alle Teilnehmenden erfolgen und geprüft werden. Auf diese Weise kann im Sinne von Kriterium 5: *interne Validität* ein Zusammenhang zwischen Methodenanwendung und den erfassten Wirkungen hergestellt werden, was zur Validität der Ergebnisse zur Wirksamkeit der Konstruktionsmethode beiträgt.

7.3.4.2 Unterstützung im Aufbau von vergleichbaren Studien

Aufbauend auf der qualitativen Studie mit Fokus auf der Anwendbarkeit konnte eine Weiterentwicklung des Studiendesigns für die quantitative Erhebung der Wirksamkeit erfolgen. Zuvor wurde dargelegt, dass C&C²-Modelle vergleichbar zu anderen qualitativen Modellen sind und die Vorgehensweise zur Modellbildung auf diese Modelle übertragen werden kann (siehe Kapitel 7.1). Daher kann die für die quantitative Studie entwickelte Erhebungsmethode für weitere Untersuchungen zur Modellbildung in der Konstruktion genutzt werden. Auf diese Weise können die Ergebnisse zur Modellbildung mit C&C²-A als Benchmark für diese Untersuchungen dienen. Die verwendeten Aufgabenstellungen und Variablen zur Erfassung des Systemverständnisses können für eine Reproduktion der Studie verwendet werden, da sie auf einer Open-Source-Plattform⁷ erstellt wurden.

Dadurch, dass im Vorfeld der Validierung ein *Impact Model* erstellt wurde, in dem erwartete Zusammenhänge zwischen Konstruktionsmethode und ihren Wirkungen festgehalten wurden (siehe Abbildung 7.2), konnten diese Zusammenhänge gezielt überprüft werden. Auf diese Weise wurde sichtbar, wie die entwickelten Variablen zur Erhebung des Systemverständnisses eingesetzt werden können. Für das Systemverständnis auf Systemebene konnten eindeutige Ergebnisse erzielt werden. Diese können durch Reproduktion der Studie geprüft oder als Benchmark für die Untersuchung anderer Methoden zur Modellbildung herangezogen werden. Es konnte also eine Variable für das Systemverständnis auf Systemebene definiert werden, über die eine inhaltliche Vergleichbarkeit zur Wirksamkeit anderer Methoden zur Modellbildung hergestellt werden kann (vgl. Abbildung 7.11). Diese Vergleichbarkeit entsteht jedoch erst, wenn die Variable von anderen Forschenden genutzt wird.

Zusammengefasst konnten durch die Anwendung des Validierungs-Navigators für die quantitative Studie eine Einbettung in den Prozess der Methodvalidierung (siehe Kapitel 6.2.1.1) und die in Kapitel 7.1 illustrierte Vergleichbarkeit zu ähnlichen Modellen (vgl. Strategie B aus Kapitel 5.2.2.1) umgesetzt werden. Zusätzlich konnte eine für die Validierung anderer Methoden einsetzbare Variable (vgl. Strategie A aus Kapitel 5.2.2.1) für eine Quantifizierung der auftretenden Wirkungen definiert werden.

⁷ Ein Zugang für interessierte Forschende kann auf Anfrage eingerichtet und die Schulung sowie die Aufgabenstellungen und Datenerhebungsmethode auf diese Weise von anderen Forschenden direkt genutzt werden.

7.4 Fazit zur zweiten deskriptiven Studie – Reflexion zum Validierungs-Navigator

Durch die innerhalb des Validierungs-Navigators beschriebenen Schritte unter Einbezug der in Kapitel 5 identifizierten Strategien konnten eine qualitative (Kapitel 7.2) und eine quantitative Studie (Kapitel 7.3) zur Validierung der Wirkung der Modellbildung mit C&C²-A konzipiert, durchgeführt und ausgewertet werden. In diesem Kapitel soll ein Fazit zur Evaluation des Referenzprozesses gezogen werden. Dazu werden zunächst Einschränkungen der Evaluation beschrieben, um anschließend die Einflüsse des Referenzprozesses auf die Qualität und Vergleichbarkeit von Studien zur Validierung der Wirksamkeit von Konstruktionsmethoden zusammenzufassen. Auf diese Weise wird Forschungsfrage 3: „*Welchen Einfluss hat die Anwendung des Referenzprozesses auf die Qualität und Vergleichbarkeit von Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden?*“ beantwortet.

7.4.1 Einschränkungen der Evaluation

Die Evaluation des Referenzprozesses fand im Rahmen dieser Arbeit in Form einer exemplarischen Anwendung auf die Validierung der Konstruktionsmethode *Modellbildung mit C&C²-A* statt. Daher handelt es sich um eine Illustration der sich bietenden Potentiale und Risiken des Validierungs-Navigators und nicht um eine abschließende Validierung des Prozesses. Die beschriebene Illustration ermöglicht dennoch eine Diskussion der möglichen Beiträge des Referenzprozesses. So wird das Ziel dieser Arbeit, einen Anstoß für den Aufbau von vergleichbaren Studien zu geben, der eine spätere Standardisierung ermöglichen kann, weiterhin adressiert.

Eine weitere Einschränkung bildet das Fehlen etablierter Variablen und zugehörigen Erhebungsmethoden, was eine Co-Evolution von Konstruktions- und Forschungsmethode nötig machte. Diese Co-Evolution soll nicht dazu führen, dass wie bisher häufig üblich, Variablen und Erhebungsmethoden individuell für jede Konstruktionsmethode entwickelt werden. Ein Ziel der illustrativen Evaluation ist es daher, ein Beispiel zu geben, wie trotz fehlender etablierter Variablen Verknüpfungen zu bestehenden Konstruktionsmethoden, Modellen und Werkzeugen oder auch zu bestehender Theorie identifiziert und genutzt werden können. Durch die Anwendung des Validierungs-Navigators unter Einbezug der Co-Evolution entstehen daher keine Erhebungsmethoden und Variablen, die direkt vergleichbar mit bestehenden Validierungsstudien sind. Vielmehr wird durch die identifizierten Verknüpfungen mit bestehender Forschung ein Potential für die Vergleichbarkeit zukünftiger Studien geschaffen, die die neu entwickelten Erhebungsmethoden und Variablen nutzen und weiterentwickeln.

Die weitere Evaluation des Referenzprozesses sollte deshalb durch die Anwendung für den Aufbau von Studien zur Validierung der Wirkung von weiteren Konstruktionsmethoden mit einer anschließenden kritischen Reflexion des Vorgehens erfolgen. Adaptionen und Weiterentwicklungen des Validierungs-Navigators sind dabei erwünscht und tragen zu einer Wiederverwendung bei.

7.4.2 Einschätzung zur Eignung des Validierungs-Navigators

Die Einschätzung zur Eignung des Validierung-Navigators ist aus der illustrativen Evaluation innerhalb dieser Arbeit abgeleitet und deshalb unter den Einschränkungen aus Kapitel 7.4.1 zu sehen. Die Beiträge sind in Abbildung 7.12 zusammenfassend dargestellt und werden im Folgenden detaillierter erläutert.

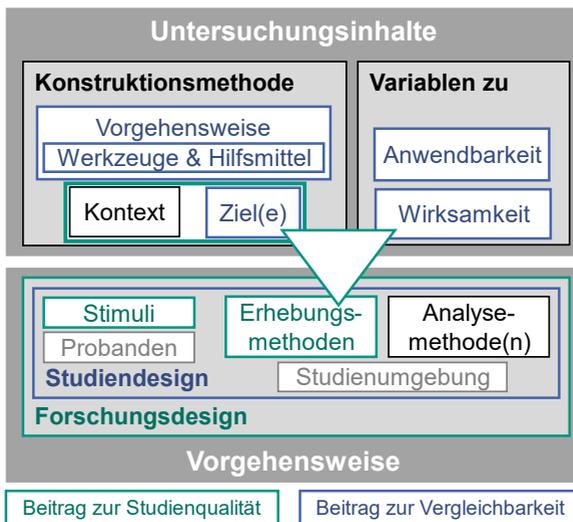


Abbildung 7.12: Visualisierung der Beiträge aus der Anwendung des Validierungs-Navigators in Bezug auf die Untersuchungsinhalte und Vorgehensweise. Wo Beiträge zur Studienqualität geleistet werden konnten ist in grün hervorgehoben, Beiträge zur Vergleichbarkeit in blau.

Durch die Anwendung des Validierungs-Navigators konnten sowohl auf inhaltlicher Ebene als auch in Bezug auf die Vorgehensweise die Qualität und Vergleichbarkeit Studien beeinflusst werden.

7.4.2.1 Beitrag zur Studienqualität

Der Referenzprozess konnte auf verschiedenen Ebenen zur Studienqualität beitragen. Durch die **Teilung der Untersuchung in zwei gleichbedeutende Studien** wurde in der Anwendung des Referenzprozesses bereits ein tiefergehendes Verständnis zu den bestehenden Einflüssen in der qualitativen Studie ermöglicht, bevor eine quantitative Erhebung stattfand. Insbesondere konnte die für eine Wirksamkeit notwendige vollständige und korrekte Anwendung der Konstruktionsmethode durch eine Erhöhung der Anwendbarkeit begünstigt werden (siehe Kriterium 5: interne Validität). Es kann also gefolgert werden, dass das Forschungsdesign innerhalb des Validierungs-Navigators in Form eines qualitativen und eines quantitativen Probandenexperiments zur Validierung der Wirkung von Konstruktionsmethoden zur Qualität der einzelnen Studien beiträgt (vgl. Abbildung 7.12).

Die im Prozess für die **qualitative Studie** beschriebene direkte Beobachtung der Anwendung der Konstruktionsmethode und eine nachfolgende qualitative Analyse waren hilfreich, um Schlüsselstellen für eine Optimierung der Anwendbarkeit zu identifizieren. So konnte ein maßgeblicher Einfluss der Aufgabenstellungen und Stimuli (siehe Kriterium 3: Aufgabenstellung) auf den individuellen Bedarf nach einer methodischen Unterstützung und folglich auf die potentielle Wirksamkeit der Konstruktionsmethode gefunden werden (vgl. Abbildung 7.12). Darauf aufbauend wurden die Konstruktions- und Erhebungsmethode in drei Iterationen weiterentwickelt. Die *Verständlichkeit* wurde durch eine Evaluation und Optimierung der Methodeneinführung adressiert. Eine Betrachtung der *Benutzerfreundlichkeit* ermöglichte es, einen für die Anwendbarkeit und Leistung kritischen Schritt in der Konstruktionsmethode zu identifizieren. Zusätzlich konnte für die Erfassung der *Korrektheit der Anwendung* ein Template erarbeitet werden, das in der quantitativen Untersuchung verwendet werden kann.

Durch die Sicherstellung einer hohen Anwendbarkeit durch die qualitative Studie und die Prüfung der Anwendung durch das Template konnte in der **quantitativen Studie** der Einfluss der Störgröße *fehlerhafte Anwendung* reduziert werden. Auf diese Weise konnten Daten zu Zusammenhängen zwischen Anwendung der Konstruktionsmethode und dem Systemverständnis (siehe Kriterium 4: Nutzen) erhoben mit einer geringeren Beeinflussung durch diese Störgröße erhoben werden. Durch im Prozess vorgeschlagene Strategien konnten die Gütekriterien positiv beeinflusst werden. Die *Objektivität* wurde durch eine digitale und reproduzierbare Methodeneinführung, Datenerhebung und Auswertung begünstigt. Die Studiendurchführung

in mehreren Durchgängen zeigte die *Reliabilität* der Ergebnisse. Die *Validität* konnte durch die Reduktion von Störgrößen erhöht werden, indem mehrere Stimuli und Teilnehmergruppen miteinander abgeglichen wurden.

Durch die **Einbettung in den Prozess der Methodvalidierung** trug der Validierungs-Navigator dazu bei, die Konsistenz der Konstruktionsmethode (siehe Kriterien 1 und 2: Angemessenheit der Einzelkomponenten und logische Konsistenz) vor der empirischen Validierung zu prüfen, indem auf bestehende Erfahrungen zur Nutzung der innerhalb der Methode beschriebenen Modelle zurückgegriffen wurde. Durch die Darstellung der zu untersuchenden Zusammenhänge in einem *Impact Model* wurde Bezug zu bestehenden Untersuchungen zum Einfluss des Systemverständnisses auf die Produktentwicklung hergestellt. Auf diese Weise konnte das Ziel der Konstruktionsmethode mit dem adressierten Kontext verknüpft werden (vgl. Abbildung 7.12) was die nachfolgende empirische Validierung der Leistung mit einbezieht (siehe Kriterium 6: externe Validität).

Die **Co-Evolution von Konstruktions- und Forschungsmethode** ermöglichte es zudem, eine gute Passung zwischen den Zielen der Konstruktionsmethode und der Operationalisierung der Wirksamkeit herzustellen (dargestellt als Dreieck in Abbildung 7.12). Es konnte das Ziel, das Systemverständnis auf Systemebene zu erhöhen durch eine passende Variable abgebildet und mit einer geeigneten Erhebungsmethode ein Zusammenhang quantifiziert werden. Im Fall des Systemverständnisses auf Detailebene konnte festgestellt werden, dass diese Passung nicht ausreichend vorhanden ist.

7.4.2.2 Unterstützung im Aufbau von vergleichbaren Studien

Durch die Vorgabe von Probandenexperimenten als grundlegendes Studiendesign sind die durch die Anwendung des Referenzprozesses aufgebauten Studien in Art und Beschaffenheit der Ergebnisse vergleichbar zu anderen Probandenexperimenten (vgl. Studiendesign in Abbildung 7.12). Zusätzlich besteht durch die durchgängige Nutzung der Grundstruktur des Studiendesigns innerhalb der qualitativen und quantitativen Studie eine Vergleichbarkeit der Studien innerhalb des Referenzprozesses.

Im Rahmen der **Strategie A: Anstreben einheitlicher Methodenziele und Variablen** wurde zum einen auf bestehenden Variablen zur Anwendbarkeit aufgebaut (vgl. Abbildung 7.12). Zum anderen konnten Studien identifiziert werden, die mit dem Einsatz von Produktmodellen das Ziel verfolgten, das technische Systemverständnis zu erhöhen. Aufbauend auf diesen vergleichbaren Zielen konnten die Grundgedanken zur Operationalisierung der Wirksamkeit der Modellbildung genutzt werden, um Variablen für das Systemverständnis zu erarbeiten, die auch für die

Untersuchung anderer Konstruktionsmethoden mit dem Ziel der Erhöhung des technischen Systemverständnisses eingesetzt werden können. Auf diese Weise entsteht eine inhaltliche Vergleichbarkeit zur Untersuchung der Wirksamkeit dieser vergleichbaren Methoden (vgl. Abbildung 7.12).

Zusätzlich konnten durch **Strategie B: Nutzung etablierter Modelle und Werkzeuge** vergleichbare Modelle identifiziert werden und so ein Template als Werkzeug für die Modellbildung erstellt werden, das auf andere Modellbildungsprozesse übertragbar ist. Damit bildet es ein vergleichbares Hilfsmittel innerhalb der Vorgehensweise der Konstruktionsmethode (vgl. Abbildung 7.12).

Durch die Nutzung der *Impact Models* und der Analyse nach Durchführung der quantitativen Studie konnte zudem die Erkenntnis gewonnen werden, dass technisches Systemverständnis auf Systemebene nicht zwingend ein Systemverständnis auf Detailebene voraussetzt. Durch das detailliertere Verständnis der Zusammenhänge kann nun nach Potentialen in der Theorie anderer Disziplinen gesucht werden und auf diese Weise eine Vergleichbarkeit im Sinne von **Strategie D: Nutzung von Potentialen der Theorie** hergestellt werden.

Die durch die Anwendung des Referenzprozesses erreichten Einflüsse auf die Vergleichbarkeit von Studien können daher wie folgt zusammengefasst werden:

Durch die Anwendung des Validierungs-Navigators konnten die in der ersten deskriptiven Studie identifizierten Strategien umgesetzt werden, wodurch ein Beitrag zur Vergleichbarkeit des Studiendesigns sowie der Methodenziele und Variablen für die *Anwendbarkeit* und *Wirksamkeit* geleistet werden konnte.

Zusätzlich konnten Potentiale für die inhaltliche Vergleichbarkeit mit der Theorie aus anderen Disziplinen identifiziert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst. Abschließend wird ein Ausblick auf mögliche nachfolgende Forschungsaktivitäten gegeben.

8.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Referenzprozess für Validierungsstudien zur Wirkung von Konstruktionsmethoden entwickelt und evaluiert. In der Konstruktionsforschung fehlt bisher ein Standard für Forschungsmethoden, der eine Orientierung im Aufbau von Validierungsstudien geben kann. Für die Etablierung eines solchen Standards ist eine Referenz notwendig. Bestehende Ansätze für die Validierung von Konstruktionsmethoden geben einen Überblick über mögliche Forschungsdesigns und beschreiben mehrere mögliche Forschungsmethoden. Im Stand der Forschung finden sich zudem Kriterien für die Studienqualität und übergeordnete Erfolgskriterien für die Validierung von Konstruktionsmethoden. Auf die vergleichbare Umsetzung einzelner Validierungsstudien im Detail und die Operationalisierung gehen bestehende Ansätze nicht ein, weshalb sie nicht als Referenz für den Aufbau einzelner Studien geeignet sind. Wie Validierungsstudien in der aktuellen Forschungspraxis durchgeführt werden und wie eine Vergleichbarkeit zwischen diesen Studien gewährleistet werden kann, ist zudem nicht bekannt.

Um eine Referenz als Grundlage für die Entstehung eines Standards bereitzustellen, wurde daher die **Entwicklung eines Referenzprozesses für die Validierung von Konstruktionsmethoden** als Zielsetzung für diese Forschungsarbeit festgelegt. Zur Erreichung der Zielsetzung wurden folgende Forschungsfragen abgeleitet:

1. Wie werden Konstruktionsmethoden aktuell im Hinblick auf Vergleichbarkeit von Studien validiert?
 - 1.1. Wie vergleichbar sind aktuelle Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden?
 - 1.2. Was sind Herausforderungen im Aufbau von vergleichbaren Studien und wie werden diese überwunden?

2. Wie können die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung und aus der Analyse der aktuellen Forschungspraxis zur Methodvalidierung in einem Referenzprozess zur Unterstützung des Aufbaus von vergleichbaren Studien kombiniert werden?
3. Welchen Einfluss hat die Anwendung des Referenzprozesses auf die Qualität und Vergleichbarkeit von Studien zur Validierung von Konstruktionsmethoden?

Forschungsfrage 1 wurde durch eine zweistufige Literaturstudie beantwortet. Durch eine Analyse von innerhalb einer Auswahl internationaler Journals veröffentlichten Validierungsstudien der Jahre 2010-2020 konnte erstmalig ein detaillierter Überblick über die aktuelle Praxis der Validierung von Konstruktionsmethoden gewonnen werden. In Bezug zur Forschungsfrage 1.1 konnte ermittelt werden, dass Studien zur Validierung der Wirkung und der Leistung bisher nur wenig vergleichbar sind, da in diesen Schritten sehr unterschiedliche Studiendesigns zum Einsatz kommen. In der Strukturvalidierung werden bereits vergleichbare Studiendesigns eingesetzt. Zur Beantwortung von Forschungsfrage 1.2 wurden ausgewählte Validierungsstudien genauer analysiert. Herausforderungen bestehen in der Vergleichbarkeit der Konstruktionsmethoden selbst sowie in der Umsetzung der Validierungsstudien. Konstruktionsmethoden können durch eine *einheitlichere Zielsetzung und zugehörige Variablen* sowie die *Nutzung etablierter Modelle und Werkzeuge* vergleichbarer in Studien validiert werden. Durch eine Anknüpfung an die *Theorie* kann die Vergleichbarkeit in Bezug auf die den Methoden zugrundeliegenden Wirkmechanismen erhöht werden. Eine *Modellierung der Praxis im Laborkontext* kann dazu beitragen, dass Validierungsstudien in Bezug zum adressierten Kontext vergleichbarer werden.

Forschungsfrage 2 konnte durch die Entwicklung des **Validierungs-Navigators** beantwortet werden. Der **Validierungs-Navigator** stellt einen Prozess für Validierungsstudien zur Wirkung dar. In den Prozess wurden die sechs Kriterien aus dem *Validation Square* (Pedersen et al., 2000) und *Impact Models* aus der *DRM* (Blessing & Chakrabarti, 2009) als geeignete Elemente aus bestehenden Ansätzen integriert. Der Prozess gibt zudem Probandenexperimente vor, da diese sowohl durch die Ergebnisse zu Forschungsfrage 1 als auch durch verschiedene Autoren im Stand der Forschung als geeignetes Studiendesign zur Validierung der Wirkung gesehen werden. Zusätzlich wird auf diese Weise die Wahl des Studiendesigns vereinheitlicht. Das in bisherigen Untersuchungen unterrepräsentierte Erfolgskriterium *Anwendbarkeit* wird im Validierungs-Navigator durch eine qualitative Studie explizit berücksichtigt. Die *Wirksamkeit* wird durch eine nachfolgende, quantitative Studie fokussiert. Durch diese Abfolge kann erstmalig die Abhängigkeit der *Wirksamkeit* von der *Anwendbarkeit* berücksichtigt werden. Zusätzlich kann so ein Verständnis

der Auswirkungen der Methodenanwendung aufgebaut werden, bevor eine quantitative Erhebung stattfindet. In Detailprozessen zu den beiden Teilstudien wurden außerdem die im Rahmen von Forschungsfrage 1.2 identifizierten Strategien zu einer Erhöhung der Vergleichbarkeit integriert. Aktuell kann in der Regel für den Aufbau von Validierungsstudien nicht auf Standard-Ehebungsmethoden zurückgegriffen werden. Die Entwicklung von Erhebungsmethoden begleitend zur Validierung einer Konstruktionsmethode ist daher üblich. Im Validierungs-Navigator wird die daraus entstehende Co-Evolution von Konstruktions- und Forschungsmethode berücksichtigt.

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 wurde der Validierungs-Navigator exemplarisch angewendet, um eine Validierung der Wirkung der Konstruktionsmethode *Modellbildung mit C&C²-A* durchzuführen. Verschiedene Anteile des Validierungs-Navigators konnten dabei Beiträge zur Studienqualität leisten. Die Kriterien aus dem *Validation Square* unterstützten die Prüfung in Bezug auf die Studienqualität. Die Trennung der Untersuchung in qualitative und quantitative Studie ermöglichte eine Weiterentwicklung von Konstruktionsmethode und Erhebungsmethode vor Durchführung der quantitativen Studie. Auf diese Weise konnte eine tatsächliche Anwendung der Konstruktionsmethode sichergestellt und ein Beitrag zur internen Validität geleistet werden. Durch die Erstellung eines *Impact Models* konnte außerdem ein Bezug zur Praxis hergestellt und damit ein Beitrag zur externen Validität geleistet werden. Durch die Anwendung des Validierungs-Navigators konnten Strategien zur Erhöhung der Vergleichbarkeit umgesetzt werden. Im Vorfeld der Validierung wurden zu C&C²-Modellen vergleichbare Modelle mit einem ähnlichen Modellzweck identifiziert. Mithilfe des Modellzwecks konnte eine, zu bestehenden Untersuchungen vergleichbare, Zielsetzung und Operationalisierung vorgenommen werden.

Der Beitrag dieser Arbeit für die Konstruktionsforschung besteht in der Bereitstellung eines Vorgehens zum Aufbau von vergleichbaren Validierungsstudien zur Wirkung von Konstruktionsmethoden. Bei wiederholter Verwendung und Weiterentwicklung kann sich der Validierungs-Navigator zu einem Standardprozess für die Untersuchung der Wirksamkeit von Konstruktionsmethoden entwickeln.

8.2 Ausblick

Durch die vorliegende Arbeit konnten Erkenntnisse zur aktuellen Praxis der Untersuchung von Konstruktionsmethoden gewonnen und ein Referenzprozess entwickelt werden. Auf dieser Grundlage lassen sich weitere Forschungsbedarfe ableiten.

Als Referenzprozess sollte der Validierungs-Navigator für Validierungsstudien zur Wirkung weiterer Konstruktionsmethoden eingesetzt werden. Zum einen um seine Wiederverwendbarkeit zu prüfen und zum anderen um vergleichbare Validierungsstudien durchzuführen. Durch eine wiederholte Anwendung und Weiterentwicklung des Referenzprozesses kann so auf einen Standard für Variablen und Forschungsmethoden in der Validierung der Wirkung verschiedener Klassen von Konstruktionsmethoden hingearbeitet werden. Die Erkenntnisse aus der zweistufigen Literaturstudie zur aktuellen Praxis der Validierung von Konstruktionsmethoden legen zudem nahe, dass bisher nur selten Gemeinsamkeiten verschiedener Konstruktionsmethoden beschrieben werden. Durch die Nutzung des Validierungs-Navigators können solche Gemeinsamkeiten von Konstruktionsmethoden herausgearbeitet werden, um die Definition von Klassen von Konstruktionsmethoden zu unterstützen.

Großes Potential bietet zudem die Identifikation von übertragbaren Variablen für die Erfolgskriterien *Anwendbarkeit*, *Nutzen* und *Akzeptanz*. Der Validierungs-Navigator beinhaltet bereits auf andere Konstruktionsmethoden übertragbare Variablen für die Untersuchung der *Anwendbarkeit* in qualitativen Studien. Diese Variablen haben sich in der vorliegenden Arbeit als geeignete Indikatoren bewährt, um sowohl das Studiendesign als auch die Einführung der Konstruktionsmethode weiterzuentwickeln. Für das Erfolgskriterium *Akzeptanz* sind solche übertragbaren Variablen ebenfalls denkbar, da zur Akzeptanz direkt eine Selbsteinschätzung der Anwendenden der Konstruktionsmethode eingeholt werden kann. Forschungsbedarf besteht vor allem darin, übertragbare Variablen für den *Nutzen* von Konstruktionsmethoden zu entwickeln. Optimaler Weise ermöglichen diese zu entwickelnden Variablen eine Erhebung unabhängig vom Kontext, sowohl im Labor als auch im Feld. Eine solche Erhebung kann über Biosignale erfolgen. Vielversprechende Ansätze bestehen hier beispielsweise in Untersuchungen zur kognitiven Belastung (engl. Cognitive Load) mittels Eye-Tracking.

Der Betrachtungsrahmen in dieser Arbeit wurde auf die Untersuchung der Wirkung von Konstruktionsmethoden in einem kontrollierten Umfeld eingeschränkt. Um Konstruktionsmethoden umfassend validieren zu können, sollte dieser Rahmen auf reale oder vergleichbare Kontexte für eine Validierung der Leistung erweitert werden. Dazu können die im vorhergehenden Absatz erläuterten Variablen beitragen, indem sie Untersuchungen relevanter Faktoren im Feld ermöglichen. Eine weitere Möglichkeit ist es, die im Feld relevanten Faktoren ins Labor zu bringen, um mehr Nähe zur Praxis zu schaffen, ohne die Vorteile einer kontrollierten Umgebung aufzugeben. Dazu kann die in dieser Arbeit identifizierte Strategie *C Modellierung von Zielen aus der Praxis* beitragen, wie sie von Cardin et al. (2013) angewendet wird. Es besteht weiterhin ein Bedarf dazu, für die Konstruktionspraxis relevante Faktoren zu modellieren und dadurch für Untersuchungen im Labor zugänglich zu machen.

Literaturverzeichnis

- Ahmad, N., Wynn, D. C. & Clarkson, P. J. (2013). Change impact on a product and its redesign process: A tool for knowledge capture and reuse. *Research in Engineering Design*, 24(3), 219–244. <https://doi.org/10.1007/s00163-012-0139-8>
- Albers, A. & Braun, A. (2011). A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. *International Journal of Product Development*, 15(1-3), Artikel 43659, 6–25. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2011.043659>
- Andreasen, M. M., Hansen, C. T. & Cash, P. (2015). *Conceptual Design*. Springer International Publishing. Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19839-2>
- Augustine, M., Yadav, O. P., Jain, R. & Rathore, A. (2012). Cognitive map-based system modeling for identifying interaction failure modes. *Research in Engineering Design*, 23(2), 105–124. <https://doi.org/10.1007/s00163-011-0117-6>
- Bacciotti, D., Borgianni, Y., Cascini, G. & Rotini, F. (2016). Product Planning techniques: investigating the differences between research trajectories and industry expectations. *Research in Engineering Design*, 27(4), 367–389. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0223-6>
- Baek, J. S., Kim, S., Pahk, Y. & Manzini, E. (2018). A sociotechnical framework for the design of collaborative services. *Design Studies*, 55, 54–78. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.01.001>
- Baek, J. S., Meroni, A. & Manzini, E. (2015). A socio-technical approach to design for community resilience: A framework for analysis and design goal forming. *Design Studies*, 40, 60–84. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2015.06.004>
- Baron, R. M. & Kenny, D. A. (1986). The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of Personality and Social Psychology*, 51(6), 1173–1182.
- Baylis, K., Zhang, G. & McAdams, D. A. (2018). Product family platform selection using a Pareto front of maximum commonality and strategic modularity. *Research in Engineering Design*, 29(4), 547–563. <https://doi.org/10.1007/s00163-018-0288-5>
- Beckmann, G. & Krause, D. (2013). Process visualisation of product family development methods. In U. Lindemann, S. Venkataraman, Y. Kim, S. Lee, Y.

- Reich & A. Chakrabarti (Hrsg.), *DS 75-2: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13): Seoul, Korea, 19.-22.08.2013* (S. 169–178). Design Society. Castle Cary.
- Beetz, J.-P. & Kirchner, E. (2019). Das Wirkraummodell – Ein Hilfsmittel bei der Gestaltung sauberkeitsrelevanter Produkte. *Forschung im Ingenieurwesen*, 83(4), 933–946. <https://doi.org/10.1007/s10010-019-00375-0>
- Bender, B [Beate] & Gericke, K. (Hrsg.). (2021). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre* (9. Aufl.). Springer. Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7>
- Bender, B [Bernd] (2003). Task design and task analysis for empirical studies into design activity. *Journal of Engineering Design*, 14(4), 399–408. <https://doi.org/10.1080/09544820310001606894>
- Bender, B [Bernd]. (2004). *Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung*. Dissertation. Technische Universität Berlin. *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente: Bd. 377*. VDI-Verlag. Düsseldorf.
- Bender, B [Bernd], Reinicke, T., Wünsche, T. & Blessing, L. T. M. (2002). Application of methods from social sciences in design research. In D. Marjanović (Hrsg.), *DS 30: Proceedings of DESIGN 2002, the 7th International Design Conference: Dubrovnik, Croatia, 14.-17.05.2002* (S. 7–16). Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Zagreb.
- Blessing, L. T. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. Springer. London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>
- Bloom, B. S., Engelhart, M. D., Furst, E. J., Hill, W. H. & Krathwohl, D. R. (1956). *Taxonomy of Educational Objectives - The Classification of Educational Goals: Handbook 1: Cognitive Domain*. Longmans, Green and Co Ltd. London.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation: In den Sozial- und Humanwissenschaften* (4. Aufl.). Springer Medizin Verlag. Heidelberg.
- Brahma, A. & Wynn, D. C. (2020). Margin value method for engineering design improvement. *Research in Engineering Design*, 31(3), 353–381. <https://doi.org/10.1007/s00163-020-00335-8>
- Brangier, E. & Bornet, C. (2011). Persona: A Method to Produce Representations Focused on Consumers' Needs. In W. Karwowski (Hrsg.), *Ergonomics design and management : theory and applications. Human factors and ergonomics in consumer product design* (S. 37–61). CRC Press. Boca Raton.
- Burns, P. B., Rohrich, R. J. & Chung, K. C. (2011). The Levels of Evidence and their role in Evidence-Based Medicine. *Plastic and reconstructive surgery*, 128(1), 305–310. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e318219c171>

- Camere, S., Schifferstein, H. & Bordegoni, M. (2018). From abstract to tangible: Supporting the materialization of experiential visions with the experience map. *International Journal of Design*, 12(2), 51–73.
- Cardin, M.-A., Jiang, Y. & Lim, T. (2017). Empirical Studies in Decision Rule-Based Flexibility Analysis for Complex Systems Design and Management. In G. Fanmuy, E. Goubault, D. Krob & F. Stephan (Hrsg.), *Complex Systems Design & Management* (S. 171–185). Springer International Publishing. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49103-5_13
- Cardin, M.-A., Kofschoten, G. L., Frey, D. D., Neufville, R. de, Weck, O. L. de & Geltner, D. M. (2013). Empirical evaluation of procedures to generate flexibility in engineering systems and improve lifecycle performance. *Research in Engineering Design*, 24(3), 277–295. <https://doi.org/10.1007/s00163-012-0145-x>
- Cardin, M.-A., Neufville, R. de & Geltner, D. M. (2015). Design Catalogs: A Systematic Approach to Design and Value Flexibility in Engineering Systems. *Systems Engineering*, 18(5), 453–471. <https://doi.org/10.1002/sys.21323>
- Cardin, M.-A., Ranjbar-Bourani, M. & Neufville, R. de (2015). Improving the Lifecycle Performance of Engineering Projects with Flexible Strategies: Example of On-Shore LNG Production Design. *Systems Engineering*, 18(3), 253–268. <https://doi.org/10.1002/sys.21301>
- Cash, P., Stanković, T. & Štorga, M. (2016). *Experimental Design Research*. Springer International Publishing. Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-33781-4>
- Cash, P. J. (2018). Developing theory-driven design research. *Design Studies*, 56, 84–119. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2018.03.002>
- Čatić, A. & Malmqvist, J. (2013). Effective method for creating engineering checklists. *Journal of Engineering Design*, 24(6), 453–475. <https://doi.org/10.1080/09544828.2013.766824>
- Chulvi, V., González-Cruz, M. C., Mulet, E. & Aguilar-Zambrano, J. (2013). Influence of the type of idea-generation method on the creativity of solutions. *Research in Engineering Design*, 24(1), 33–41. <https://doi.org/10.1007/s00163-012-0134-0>
- Chulvi, V., Mulet, E., Chakrabarti, A., López-Mesa, B. & González-Cruz, C. (2012). Comparison of the degree of creativity in the design outcomes using different design methods. *Journal of Engineering Design*, 23(4), 241–269. <https://doi.org/10.1080/09544828.2011.624501>
- Chulvi, V., Mulet, E., Felip, F. & García-García, C. (2017). The effect of information and communication technologies on creativity in collaborative design. *Research in Engineering Design*, 28(1), 7–23. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0227-2>

- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological bulletin*, 112(1), 155–159.
<https://doi.org/10.1037//0033-2909.112.1.155>
- Corremans, J. (2011). Measuring the effectiveness of a design method to generate form alternatives: An experiment performed with freshmen students product development. *Journal of Engineering Design*, 22(4), 259–274.
<https://doi.org/10.1080/09544820903312416>
- Cross, N. (2007). Forty years of design research. *Design Studies*, 28(1), 1–4.
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2006.11.004>
- Cross, N. (2008). *Engineering design methods: Strategies for product design* (4. Aufl.). Wiley. Chichester.
- Czamecki, C., Winkelmann, A. & Spiliopoulou, M. (2013). Referenzprozessabläufe für Telekommunikationsunternehmen. *Wirtschaftsinformatik*, 55(2), 83–97. <https://doi.org/10.1007/s11576-013-0351-9>
- da Cunha Barbosa, G. E. & Souza, G. de (2017). A risk-based framework with Design Structure Matrix to select alternatives of product modernisation. *Journal of Engineering Design*, 28(1), 23–46.
<https://doi.org/10.1080/09544828.2016.1258458>
- Daalhuizen, J. & Badke-Schaub, P. (2011). The use of methods by advanced beginner and expert industrial designers in non-routine situations: a quasi-experiment. *International Journal of Product Development*, 15(1-3), 54–70. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2011.043661>
- Daalhuizen, J. & Cash, P. (2021). Method content theory: Towards a new understanding of methods in design. *Design Studies*, 75, Artikel 101018.
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2021.101018>
- DFG. (2019). *Kodex - Leitlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis: Leitlinie 11: Methoden und Standards*. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Zugriff am 17.11.2021. Verfügbar unter: <https://wissenschaftliche-integritaet.de/kodex/methoden-und-standards/>
- DFG. (2020). *Kodex - Leitlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis: Standards/Referenzen, Kommentar zu LL 11: Methoden und Standards*. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Zugriff am 17.11.2021. Verfügbar unter: <https://wissenschaftliche-integritaet.de/kommentare/standards-referenzen/>
- Eckert, C., Stacey, M. K. & Clarkson, P. J. (2003). The spiral of applied research: A methodological view on integrated design research. In A. Folkesson, K. Gralen, M. Norell & U. Sellgren (Hrsg.), *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design: Stockholm, Sweden, 19.-21.08.2003*. Design Society. Glasgow.
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017). *Integrierte Produktentwicklung: Denkbahnen, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Carl Hanser Verlag. München.
<https://doi.org/10.3139/9783446449084>

- Eisenbart, B. & Kleinsmann, M. (2017). Implementing shared function modelling in practice: experiences in six companies developing mechatronic products and PSS. *Journal of Engineering Design*, 28(10-12), 765–798.
<https://doi.org/10.1080/09544828.2017.1395395>
- Eisenmann, M., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021). Supporting early stages of design method validation - an approach to assess applicability. *Proceedings of the Design Society*, 1, 2821–2830.
<https://doi.org/10.1017/pds.2021.543>
- 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.
<https://doi.org/10.1080/09544828.2021.1950655>
- Eisenmann, M. & Matthiesen, S. (2020). Identifying reasons for a lack of method application in engineering design practice - an interview study. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 2495–2504.
<https://doi.org/10.1017/dsd.2020.261>
- Eisenmann, M. & Matthiesen, S. (2022). Guidance for design method validation: Operationalisation of efficacy. In *KIT Scientific Working Papers* (Bd. 205). Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.
<https://doi.org/10.5445/IR/1000153195>
- Fiorineschi, L., Frillici, F. S. & Rotini, F. (2020). Impact of missing attributes on the novelty metric of Shah et al. *Research in Engineering Design*, 31(2), 221–234. <https://doi.org/10.1007/s00163-020-00332-x>
- Fiorineschi, L., Frillici, F. S., Rotini, F. & Tomassini, M. (2018). Exploiting TRIZ Tools for enhancing systematic conceptual design activities. *Journal of Engineering Design*, 29(6), 259–290.
<https://doi.org/10.1080/09544828.2018.1473558>
- Frey, D. D. & Dym, C. L. (2006). Validation of design methods: lessons from medicine. *Research in Engineering Design*, 17(1), 45–57.
<https://doi.org/10.1007/s00163-006-0016-4>
- Gemser, G., Bont, C. de, Hekkert, P. & Friedman, K. (2012). Quality perceptions of design journals: The design scholars' perspective. *Design Studies*, 33(1), 4–23. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.09.001>
- Gericke, K., Eckert, C. & Stacey, M. (2017). What do we need to say about a design method. In A. Maier, S. Škec, H. Kim, M. Kokkolaras, J. Oehmen, G. Fadel, F. Salustri & M. van der Loos (Hrsg.), *DS 87-3 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17): Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017* (S. 101–110). Curran Associates Inc. Vancouver.

- Gero, J. S. & Kannengiesser, U. (2014). The Function-Behaviour-Structure Ontology of Design. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design* (S. 263–283). Springer. London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_13
- Gershenson, J. K., Prasad, G. J. & Zhang, Y. (2003). Product modularity: Definitions and benefits. *Journal of Engineering Design*, 14(3), 295–313. <https://doi.org/10.1080/0954482031000091068>
- Gladysz, B. & Albers, A. (2018). How do C&C²-Models improve efficiency, comprehensibility and scope in failure analysis - an empirical study based on two live-labs. In D. Marjanović, M. Štorga, S. Škec, N. Bojčetić & N. Pavković (Hrsg.), *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference: Dubrovnik, Croatia, 21.-24.05.2018* (S. 1127–1138). Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Zagreb. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0497>
- Glass, G. V. (1976). Primary, Secondary, and Meta-Analysis of Research. *Educational Researcher*, 5(10), 3–8. <https://doi.org/10.3102/0013189X005010003>
- Gottfredson, D. C., Cook, T. D., Gardner, F. E. M., Gorman-Smith, D., Howe, G. W., Sandler, I. N. & Zafft, K. M. (2015). Standards of Evidence for Efficacy, Effectiveness, and Scale-up Research in Prevention Science: Next Generation. *Prevention science : the official journal of the Society for Prevention Research*, 16(7), 893–926. <https://doi.org/10.1007/s11121-015-0555-x>
- Grant, M. J. & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health information and libraries journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Grauberger, P., Eisenmann, M., Stoitzner, J. & Matthiesen, S. (2021). Enhancing design method training with insights from educational research – improving and evaluating a training course for a qualitative modelling method. *SN Applied Sciences*, 3(11), Artikel 827. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04817-9>
- Grauberger, P., Eisenmann, M., Windisch, E. & Matthiesen, S. (2022). Investigating the generation of specific design knowledge: experimental validation of a qualitative modelling method. *Journal of Engineering Design*, 33(11), 870–895. <https://doi.org/10.1080/09544828.2022.2151788>
- 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. <https://doi.org/10.1080/09544828.2019.1699035>
- Hackl, J., Krause, D., Otto, K., Windheim, M., Moon, S. K., Bursac, N. & Lachmayer, R. (2020). Impact of Modularity Decisions on a Firm's Economic

- Objectives. *Journal of Mechanical Design*, 142(4), Artikel 041403.
<https://doi.org/10.1115/1.4044914>
- Hamraz, B., Caldwell, N., Ridgman, T. W. & Clarkson, P. J. (2014). FBS Linkage ontology and technique to support engineering change management. *Research in Engineering Design*, 26(1), 3–35.
<https://doi.org/10.1007/s00163-014-0181-9>
- Hatcher, G., Ion, W., Maclachlan, R., Marlow, M., Simpson, B., Wilson, N. & Wodehouse, A. (2018). Using linkography to compare creative methods for group ideation. *Design Studies*, 58, 127–152.
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2018.05.002>
- Hatchuel, A. & Weil, B. (2009). C-K design theory: an advanced formulation. *Research in Engineering Design*, 19(4), 181–192.
<https://doi.org/10.1007/s00163-008-0043-4>
- Hay, L., Duffy, A. H. B., Grealy, M., Tahsiri, M., McTeague, C. & Vuletic, T. (2020). A novel systematic approach for analysing exploratory design ideation. *Journal of Engineering Design*, 31(3), 127–149.
<https://doi.org/10.1080/09544828.2019.1662381>
- He, B. & Gu, Z. (2016). Sustainable design synthesis for product environmental footprints. *Design Studies*, 45, 159–186. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2016.04.001>
- Hofstetter, W. K. & Crawley, E. F. (2013). A methodology for portfolio-level analysis of system commonality. *Research in Engineering Design*, 24(4), 349–373. <https://doi.org/10.1007/s00163-012-0151-z>
- Horváth, I. (2016). Theory Building in Experimental Design Research. In P. Cash, T. Stanković & M. Štorga (Hrsg.), *Experimental Design Research* (S. 209–231). Springer International Publishing. Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-33781-4_12
- Howard, T. J., Culley, S. J. & Dekoninck, E. A. (2006). Information as an input into the creative process. In D. Marjanović (Hrsg.), *DS 36: Proceedings DESIGN 2006, the 9th International Design Conference: Dubrovnik, Croatia, 15.-18.05.2006* (Bd. 9, S. 549–556). Design Society. Glasgow.
- Howard, T. J., Culley, S. & Dekoninck, E. A. (2011). Reuse of ideas and concepts for creative stimuli in engineering design. *Journal of Engineering Design*, 22(8), 565–581. <https://doi.org/10.1080/09544821003598573>
- Hu, J. & Cardin, M.-A. (2015). Generating flexibility in the design of engineering systems to enable better sustainability and lifecycle performance. *Research in Engineering Design*, 26(2), 121–143.
<https://doi.org/10.1007/s00163-015-0189-9>
- Hussy, W., Schreier, M. & Echterhoff, G. (2013). *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor*. Springer. Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-34362-9>

- Hwang, D. & Park, W. (2018). Design heuristics set for X: A design aid for assistive product concept generation. *Design Studies*, 58, 89–126. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2018.04.003>
- Jänsch, J. (2007). *Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz: Analyse und Empfehlungen aus kognitionswissenschaftlicher Sicht*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt. *Berichte aus dem Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt: Bd. 396*. VDI-Verlag. Düsseldorf.
- Johnson, S. D. & Satchwell, R. E. (1993). The Effect of Functional Flow Diagrams on Apprentice Aircraft Mechanics' Technical System Understanding. *Performance Improvement Quarterly*, 6(4), 73–91. <https://doi.org/10.1111/j.1937-8327.1993.tb00606.x>
- Jung, E.-C. & Sato, K. (2010). Methodology for context-sensitive system design by mapping internal contexts into visualization mechanisms. *Design Studies*, 31(1), 26–45. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.07.001>
- Jung, S. & Simpson, T. W. (2016). An integrated approach to product family redesign using commonality and variety metrics. *Research in Engineering Design*, 27(4), 391–412. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0224-5>
- Karana, E., Barati, B., Rognoli, V. & Zeeuw van der Laan, A. (2015). Material driven design (MDD): A method to design for material experiences. *International Journal of Design*, 9(2), 35–54.
- Keshwani, S., Lenaou, T. A., Ahmed-Kristensen, S. & Chakrabarti, A. (2017). Comparing novelty of designs from biological-inspiration with those from brainstorming. *Journal of Engineering Design*, 28(10-12), 654–680. <https://doi.org/10.1080/09544828.2017.1393504>
- Kimita, K., Sakao, T. & Shimomura, Y. (2018). A failure analysis method for designing highly reliable product-service systems. *Research in Engineering Design*, 29(2), 143–160. <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0261-8>
- Koh, E., Caldwell, N. & Clarkson, P. J. (2013). A technique to assess the changeability of complex engineering systems. *Journal of Engineering Design*, 24(7), 477–498. <https://doi.org/10.1080/09544828.2013.769207>
- Koh, E., Förg, A., Kreimeyer, M. & Lienkamp, M. (2015). Using engineering change forecast to prioritise component modularisation. *Research in Engineering Design*, 26(4), 337–353. <https://doi.org/10.1007/s00163-015-0200-5>
- Kroll, E. & Weisbrod, G. (2020). Testing and evaluating the applicability and effectiveness of the new idea-configuration-evaluation (ICE) method of conceptual design. *Research in Engineering Design*, 31(1), 103–122. <https://doi.org/10.1007/s00163-019-00324-6>

- Lloyd, P. (2019). You make it and you try it out: Seeds of design discipline futures. *Design Studies*, 65, 167–181. [https://doi.org/10.1016/j-de-
stud.2019.10.008](https://doi.org/10.1016/j.destud.2019.10.008)
- Longmuß, J. (2003). Der Referenz-Prozess - eine Leitlinie für den gesamten Produktentstehungsprozess. *Konstruktion*, 55(9), 64–67.
- López-Mesa, B. & Bylund, N. (2011). A study of the use of concept selection methods from inside a company. *Research in Engineering Design*, 22(1), 7–27. <https://doi.org/10.1007/s00163-010-0093-2>
- Loureiro, G. B., Ferreira, J. C. E. & Messerschmidt, P. H. Z. (2020). Design structure network (DSN): a method to make explicit the product design specification process for mass customization. *Research in Engineering Design*, 31(2), 197–220. <https://doi.org/10.1007/s00163-020-00331-y>
- Maher, M. L., Poon, J. & Boulanger, S. (1996). Formalising Design Exploration as Co-Evolution. In J. S. Gero & F. Sudweeks (Hrsg.), *Advances in Formal Design Methods for CAD* (S. 3–30). Springer US. Boston. https://doi.org/10.1007/978-0-387-34925-1_1
- Marxen, L. (2014). A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 74). Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe.
- Marxen, L. & Albers, A. (2012). Supporting validation in the development of design methods. In Design Society & D. Marjanović (Hrsg.), *DS 70: Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference*. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Zagreb.
- Massetti, B. (1996). An Empirical Examination of the Value of Creativity Support Systems on Idea Generation. *MIS quarterly*, 20(1), 83–97.
- Matthiesen, S. (2002). *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Dissertation. Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe.
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung – Prozess und Methoden. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre* (9. Aufl., S. 397–465). Springer. Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_13
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Bremer, F. & Nowoseltschenko, K. (2019). Product models in embodiment design: an investigation of challenges and opportunities. *SN Applied Sciences*, 1(9), Artikel 1078. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-11115-y>
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Hölz, K., Nelius, T., Bremer, F., Wettstein, A., Gesinger, A., Pflieger, B., Nowoseltschenko, K. & Voß, K. (2018). Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse

- und Synthese. In *KIT Scientific Working Papers* (Bd. 58). Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe.
<https://doi.org/10.5445/IR/1000080744>
- Miaskiewicz, T. & Kozar, K. A. (2011). Personas and user-centered design: How can personas benefit product design processes? *Design Studies*, 32(5), 417–430. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.03.003>
- 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 *2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE 2015): Rome, Italy, 28.-30.09.2015* (S. 50–55). IEEE. Piscataway. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2015.7302511>
- Moreno, D. P., Hernández, A. A., Yang, M. C., Otto, K. N., Hölltä-Otto, K., Lindsey, J. S., Wood, K. L. & Linden, A. (2014). Fundamental studies in Design-by-Analogy: A focus on domain-knowledge experts and applications to transactional design problems. *Design Studies*, 35(3), 232–272.
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2013.11.002>
- Motte, D., Bjärnemo, R. & Jönson, G. (2018). Evaluation of a method supporting the integration of packaging development into product development using an assessment framework for methodologies under development. In I. Horváth, J. P. Suárez Rivero & P. M. Hernández Castellano (Hrsg.), *Proceedings of the 12th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering - TMCE 2018: Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 07.-11.05.2018* (471-486). Delft University of Technology. Delft.
- Motte, D. & Eriksson, M. (2016). Assessment framework for a methodology under development - application to the PDA methodology. In I. Horváth, J.-P. Pernot & Z. Rusák (Hrsg.), *Proceedings of the 11th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering - TMCE 2016: Aix-en-Provence, France, 09.-13.05.2016* (S. 373–388). Delft University of Technology. Delft.
- Moultrie, J. & Maier, A. M. (2014). A simplified approach to design for assembly. *Journal of Engineering Design*, 25(1-3), 44–63.
<https://doi.org/10.1080/09544828.2014.887059>
- Mulet, E., Chulvi, V., Royo, M. & Galán, J. (2016). Influence of the dominant thinking style in the degree of novelty of designs in virtual and traditional working environments. *Journal of Engineering Design*, 27(7), 413–437.
<https://doi.org/10.1080/09544828.2016.1155697>
- Nagel, R. L., Hutcheson, R., McAdams, D. A. & Stone, R. (2011). Process and event modelling for conceptual design. *Journal of Engineering Design*, 22(3), 145–164. <https://doi.org/10.1080/09544820903099575>

- Nam, T.-J. & Kim, C. (2011). Design by tangible stories: Enriching interactive everyday products with ludic value. *International Journal of Design*, 5(1), 85–98.
- Nelius, T., Eisenmann, M., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2021). 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.
<https://doi.org/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.
<https://doi.org/10.1017/dsi.2019.53>
- Pakkanen, J., Juuti, T. & Lehtonen, T. (2016). Brownfield Process: A method for modular product family development aiming for product configuration. *Design Studies*, 45, 210–241. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2016.04.004>
- Patel, A., Elena, M.-V. & Summers, J. (2019). A Systematic Approach to Evaluating Design Prompts in Supporting Experimental Design Research. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 2755–2764. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.282>
- Pedersen, K., Emblemsvåg, J., Bailey, R., Allen, J. K. & Mistree, F. (2000). Validating Design Methods and Research: The Validation Square. In D. L. Thurston (Hrsg.), *Proceedings of the 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference: Vol. 4, 12th International Conference on Design Theory and Methodology: Baltimore, USA, 10.-13.09.2000* (S. 379–390). ASME. New York. <https://doi.org/10.1115/DETC2000/DTM-14579>
- Petersen, K., Feldt, R., Mujtaba, S. & Mattsson, M. (2008). Systematic Mapping Studies in Software Engineering. In G. Visaggio, M. T. Baldassarre, S. J. Linkman & M. R. Turner (Hrsg.), *Electronic Workshops in Computing, EASE'08: Proceedings of the 12th international conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering: Bari, Italy, 26.-27.06.2008* (S. 68–77). BCS Learning & Development. Swindon.
<https://doi.org/10.14236/ewic/EASE2008.8>
- Petersson, A. M. & Lundberg, J. (2018). Developing an ideation method to be used in cross-functional inter-organizational teams by means of action design research. *Research in Engineering Design*, 29(3), 433–457.
<https://doi.org/10.1007/s00163-018-0283-x>
- Petersson, A. M., Lundberg, J. & Rantatalo, M. (2017). Ideation methods applied in a cross-functional inter-organizational group: an exploratory case study

- from the railway sector. *Research in Engineering Design*, 28(1), 71–97. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0238-z>
- Reich, Y. (2010). My method is better! *Research in Engineering Design*, 21(3), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00163-010-0092-3>
- Reiß, N., Albers, A. & Bursac, N. (2017). Approaches to increasing method acceptance in agile product development processes. In A. Maier, S. Škec, H. Kim, M. Kokkolaras, J. Oehmen, G. Fadel, F. Salustri & M. van der Loos (Hrsg.), *DS 87-3 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17): Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017* (S. 435–444). Curran Associates Inc. Vancouver.
- Robinson, M. A. (2016). Quantitative Research Principles and Methods for Human-Focused Research in Engineering Design. In P. Cash, T. Stanković & M. Štorga (Hrsg.), *Experimental Design Research* (S. 41–64). Springer International Publishing. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33781-4_3
- Salvador, F. (2007). Toward a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54(2), 219–240. <https://doi.org/10.1109/TEM.2007.893996>
- Schwede, L.-N., Greve, E., Krause, D., Otto, K., Moon, S. K., Albers, A., Kirchner, E., Lachmayer, R., Bursac, N., Inkermann, D., Rapp, S., Hausmann, M. & Schneider, J. (2022). How to Use the Levers of Modularity Properly—Linking Modularization to Economic Targets. *Journal of Mechanical Design*, 144(7), Artikel 071401. <https://doi.org/10.1115/1.4054023>
- Shah, J. J., Smith, S. M. & Vargas-Hernandez, N. (2003). Metrics for measuring ideation effectiveness. *Design Studies*, 24(2), 111–134. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(02\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(02)00034-0)
- Smith, R. P. & Eppinger, S. D. (1997). Identifying Controlling Features of Engineering Design Iteration. *Management Science*, 43(3), 276–293. <https://doi.org/10.1287/mnsc.43.3.276>
- Snelders, D., Morel, K. & Havermans, P. (2011). The cultural adaptation of web design to local industry styles: A comparative study. *Design Studies*, 32(5), 457–481. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.03.001>
- Sohn, M. & Nam, T.-J. (2015). Understanding the attributes of product intervention for the promotion of pro-environmental behavior: A framework and its effect on immediate user reactions. *International Journal of Design*, 9(2), 55–77.
- Stark, R., Buchert, T., Neugebauer, S., Bonvoisin, J. & Finkbeiner, M. (2017). Benefits and obstacles of sustainable product development methods: A case study in the field of urban mobility. *Design Science*, 3, Artikel e17. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.20>

- Strömberg, H., Pettersson, I., Andersson, J., Rydström, A., Dey, D., Klingegård, M. & Forlizzi, J. (2018). Designing for social experiences with and within autonomous vehicles-exploring methodological directions. *Design Science*, 4, Artikel e13. <https://doi.org/10.1017/dsj.2018.9>
- Teegavarapu, S., Summers, J. D. & Mocko, G. M. (2009). Case Study Method for Design Research: A Justification. In *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - 2008: Vol. 4, 20th International Conference on Design Theory and Methodology: New York, USA, 03.-06.08.2008* (S. 495–503). ASME. New York.
<https://doi.org/10.1115/DETC2008-49980>
- Tilstra, A. H., Seepersad, C. C. & Wood, K. L. (2012). A high-definition design structure matrix (HDDSM) for the quantitative assessment of product architecture. *Journal of Engineering Design*, 23(10-11), 767–789.
<https://doi.org/10.1080/09544828.2012.706748>
- Tromp, N. & Hekkert, P. (2016). Assessing methods for effect-driven design: Evaluation of a social design method. *Design Studies*, 43, 24–47.
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2015.12.002>
- Turner, P. & Turner, S. (2011). Is stereotyping inevitable when designing with personas? *Design Studies*, 32(1), 30–44. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2010.06.002>
- Üreten, S., Beckmann, G., Schwenke, E., Krause, D. & Cao, S. (2017). Continuing Education and Personalization of Design Methods to Improve their Acceptance in Practice – An Explorative Study. *Procedia CIRP*, 60, 524–529. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.012>
- 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 D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *DS 98: Proceedings of the 30th Symposium Design for X (DFX 2019): Jesteburg, Germany, 18.-19.09.2019*. Design Society. Glasgow. <https://doi.org/10.35199/dfx2019.13>
- Üreten, S., Spallek, J., Üreten, E. & Krause, D. (2020). Validation of the Design for Mass Adaptation Method – A Case for Higher Medical Treatment Quality. *Proceedings of the International Symposium on Human Factors and Ergonomics in Health Care*, 9(1), 88–100.
<https://doi.org/10.1177/2327857920091059>
- van der Bijl-Brouwer, M. & Dorst, K. (2017). Advancing the strategic impact of human-centred design. *Design Studies*, 53, 1–23.
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.003>

- Vandevenne, D., Pieters, T. & Duflou, J. R. (2016). Enhancing novelty with knowledge-based support for Biologically-Inspired Design. *Design Studies*, 46, 152–173. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2016.05.003>
- Vasconcelos, L. A. & Crilly, N. (2016). Inspiration and fixation: Questions, methods, findings, and challenges. *Design Studies*, 42, 1–32. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2015.11.001>
- 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, Artikel e7. <https://doi.org/10.1017/dsj.2016.6>
- vom Brocke, J. (2003). *Referenzmodellierung: Gestaltung und Verteilung von Konstruktionsprozessen*. Dissertation. Universität Münster. *Advances in information systems and management science: Bd. 4*. Logos-Verlag. Berlin.
- Wallisch, A., Nicklas, S. J. & Paetzold, K. (2021). Method accepted - fields of action for increasing methods application in product development. *Proceedings of the Design Society*, 1, 2037–2046. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.465>
- Weisbrod, G. & Kroll, E. (2018). Idea-configuration-evaluation (ICE): development and demonstration of a new prescriptive model of the conceptual engineering design process based on parameter analysis and C–K theory. *Research in Engineering Design*, 29(2), 203–225. <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0263-6>
- Wierenga, B. & van Bruggen, G. H. (1998). The Dependent Variable in Research into the Effects of Creativity Support Systems: Quality and Quantity of Ideas. *MIS quarterly*, 22(1), 81–87.
- Wilmsen, M., Dühr, K., Heimicke, J. & Albers, A. (2019). The First Steps Towards Innovation: A Reference Process for Developing Product Profiles. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 1673–1682. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.173>
- Wodehouse, A. & Ion, W. (2012). Augmenting the 6-3-5 method with design information. *Research in Engineering Design*, 23(1), 5–15. <https://doi.org/10.1007/s00163-011-0110-0>
- Wodehouse, A. J. & Ion, W. J. (2010). Information use in conceptual design: Existing taxonomies and new approaches. *International Journal of Design*, 4(3), 53–65.
- Wölkl, S. & Shea, K. (2009). A Computational Product Model for Conceptual Design Using SysML. In *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference - IDETC/CIE 2009: San Diego, USA, 30.08. - 02.09.2009* (S. 635–645). ASME. New York. <https://doi.org/10.1115/DETC2009-87239>

Wynn, D. C. & Eckert, C. (2017). Perspectives on iteration in design and development. *Research in Engineering Design*, 28(2), 153–184.
<https://doi.org/10.1007/s00163-016-0226-3>

Glossar

Begriff

Definition

(Daten-) Analysemethode

Analysemethoden beinhalten die Aufbereitung und Auswertung von Daten, die in einer Untersuchung durch Erhebungsmethoden aufgenommen wurden. „Die Datenaufbereitung umfasst die Schritte und Prozeduren, mit denen die Rohdaten einer empirischen Untersuchung in eine Form gebracht werden, die eine gezielte Beantwortung der Forschungsfragen und die Überprüfung der Hypothesen mithilfe von Auswertungsverfahren erlaubt.“ (Hussy et al., 2013, S. 167) Für eine anschließende quantitative Auswertung können z.B. verbale Daten klassifiziert und Häufigkeiten gezählt werden. Für eine anschließende qualitative Auswertung müssen z.B. Tonaufzeichnungen transkribiert werden. Als Methoden der quantitativen Datenauswertung werden vorwiegend statistische Verfahren zur Hypothesenprüfung wie z.B. Signifikanztests eingesetzt. Für die qualitative Auswertung kommen beispielsweise das Codieren (=Einordnung von verbalen Daten in Kategorien) oder die Inhaltsanalyse als Methoden zum Einsatz. (vgl. Hussy et al., 2013)

(Probanden-) Experiment

„Unter einem Experiment versteht man die systematische Beobachtung einer abhängigen Variablen unter verschiedenen Bedingungen einer unabhängigen Variablen bei gleichzeitiger Kontrolle der Störvariablen, wobei die zufällige Zuordnung von Probanden und experimentellen Bedingungen gewährleistet sein muss.“ (Hussy et al., 2013, S. 120)

(Daten-) Erhebungsmethode

Erhebungsmethoden dienen dazu, Sachverhalte in Untersuchungssituationen zu ermitteln und zu beschreiben. Es wird unterschieden zwischen quantitativen und qualitativen Erhebungsmethoden. Zu den quantitativen Erhebungsmethoden gehören das Beobachten unter Erfassung quantitativer Daten, das Zählen und Messen, sowie Tests zur Ermittlung von Kennwerten (wie z.B. dem IQ-Wert) oder die Messung von Biosignalen. Mit qualitativen Erhebungsmethoden werden verbale oder

	<p>visuelle Daten erzeugt. Zu den qualitativen Erhebungsmethoden für verbale Daten gehören Interviews, lautes Denken und Befragungen mit offenen Fragestellungen. Visuelle Erhebungsmethoden umfassen die (ggf. technikgestützte) direkte Beobachtung, die Eigenproduktion von Zeichnungen oder Visualisierungen mithilfe verschiedener Medien durch Studienteilnehmende oder auch die retrospektive Analyse der Untersuchungsumgebung. (vgl. Hussy et al., 2013)</p>
Forschungsmethode	<p>Forschungsmethoden beschreiben das Vorgehen zur Beantwortung wissenschaftlicher Fragestellungen. In Bezug auf den wissenschaftlichen Ansatz wird zwischen qualitativen und quantitativen Forschungsmethoden unterschieden. In Bezug auf den Forschungsprozess wird zwischen Forschungsdesign sowie Methoden zur Datenerhebung oder -analyse differenziert. (Hussy et al., 2013)</p>
Konstruktionsmethode	<p>In Bezug zur Konstruktion "Eine Spezifikation, wie ein bestimmtes Ergebnis erreicht werden soll. Dies kann Angaben dazu enthalten, wie Informationen dargestellt werden sollen, welche Informationen als Input für die Methode verwendet werden sollen, welche Werkzeuge verwendet werden sollen, welche Aktionen auf welche Weise durchgeführt werden sollen, wie die Aufgabe zerlegt werden soll und wie die Aktionen in eine Reihenfolge gebracht werden sollen." (Gericke et al., 2017, S. 105)</p>
Operationalisierung	<p>"Maßnahme zur empirischen Erfassung von Merkmalsausprägungen. Zur Operationalisierung gehören die Wahl eines Datenerhebungsverfahrens (z. B. Fragebogen, Test, physiologische Messung, Leitfadeninterview) und die Festlegung von Messoperationen (vor allem Festlegung des Skalenniveaus). In vielen Datenerhebungsmethoden sind die Regeln für die Messung bereits enthalten, etwa wenn beim Test genau festgelegt ist, welchen Aufgabenlösungen (empirisches Relativ) welche Punktzahlen (numerisches Relativ) zuzuordnen sind." (Bortz & Döring, 2006, S. 736)</p>
Referenzprozess	<p>Ein „generischer Prozess, der die üblichen Abfolgen von Aktivitäten, Methoden und Prozessen für die Entwicklung unterschiedlicher Produkte beschreibt.“ Wilmsen et al. (2019, S. 1675). Im Übertrag auf die Forschung beschreibt ein Referenzprozess eine übliche Abfolge von Aktivitäten und Forschungsmethoden, die für unterschiedliche Forschungsvorhaben genutzt werden kann.</p>

Stimulus	Eine Aktion oder Objekt, das eine Reaktion der Probanden hervorruft (in Anlehnung an die experimentelle Psychologie).
Studiendesign	Das Studiendesign beschreibt das Forschungsdesign einer einzelnen Studie. Ein Forschungsdesign legt die übergreifende Vorgehensweise fest, die auf das Untersuchungsziel ausgerichtet ist; also z.B. das <i>Experiment</i> zur Prüfung einer Hypothese (vgl. Hussy et al., 2013).

Anhang

A.1 Erste deskriptive Studie

A.1.1 Übersicht kategorisierter Studien

Tabelle A.1.1: Kategorisierung der im Rahmen der ersten deskriptiven Studie identifizierten Validierungsstudien. Übersetzt aus Eisenmann, Grauberger, Üreten et al. (2021)

Validierungsschritt	Evidenzstufe	Beitrag mit Validierungsstudie
Struktur	III	Koh et al. (2015) [Study 2]
Struktur	V	Augustine et al. (2012)
Struktur	V	Bacciotti et al. (2016)
Struktur	V	Baek et al. (2015)
Struktur	V	Brahma und Wynn (2020)
Struktur	V	da Cunha Barbosa und Souza (2017)
Struktur	V	He und Gu (2016)
Struktur	V	S. Jung und Simpson (2016)
Struktur	V	Koh et al. (2013)
Struktur	V	Loureiro et al. (2020)
Struktur	V	Miaskiewicz und Kozar (2011)
Struktur	V	Tilstra et al. (2012)
Struktur	V	Turner und Turner (2011)
Struktur	V	van der Bijl-Brouwer und Dorst (2017)
Struktur	V	Weisbrod und Kroll (2018)
Wirkung	II	Chulvi et al. (2013)
Wirkung	II	Chulvi et al. (2012)
Wirkung	II	Corremans (2011)
Wirkung	II	Howard et al. (2011)
Wirkung	II	Hwang und Park (2018)
Wirkung	II	Keshwani et al. (2017)
Wirkung	II	Vandevenne et al. (2016)
Wirkung	III	Hatcher et al. (2018)
Wirkung	III	Moreno et al. (2014)
Wirkung	III	Petersson und Lundberg (2018)
Wirkung	III	Petersson et al. (2017)
Wirkung	III	Sohn und Nam (2015)
Wirkung	III	A. Wodehouse und Ion (2012)

Wirkung	IV	Ahmad et al. (2013)
Wirkung	IV	Camere et al. (2018) [Study 1]
Wirkung	IV	Camere et al. (2018) [Study 2]
Wirkung	IV	Fiorineschi et al. (2018)
Wirkung	IV	López-Mesa und Bylund (2011)
Wirkung	IV	Moultrie und Maier (2014)
Wirkung	IV	Nagel et al. (2011)
Wirkung	IV	Strömberg et al. (2018)
Wirkung	IV	A. J. Wodehouse und Ion (2010)
Wirkung	V	Baylis et al. (2018)
Wirkung	V	Čatić und Malmqvist (2013)
Wirkung	V	Hofstetter und Crawley (2013)
Wirkung	V	Kimita et al. (2018)
Wirkung	V	Koh et al. (2015) [Study 1]
Leistung (Labor)	II	Cardin et al. (2013)
Leistung (Labor)	IV	Kroll und Weisbrod (2020)
Leistung (Labor)	IV	Nam und Kim (2011)
Leistung (Labor)	IV	Tromp und Hekkert (2016)
Leistung (Labor)	V	Hamraz et al. (2014)
Leistung (Labor)	V	E.-C. Jung und Sato (2010)
Leistung (Labor)	V	Karana et al. (2015)
Leistung (Feld)	III	Snelders et al. (2011)
Leistung (Feld)	IV	Baek et al. (2018)
Leistung (Feld)	IV	Stark et al. (2017)
Leistung (Feld)	V	Eisenbart und Kleinsmann (2017)
Leistung (Feld)	V	Pakkanen et al. (2016)

A.2 Zweite deskriptive Studie

A.2.1 Einführung der Modellbildung mit C&C²-A

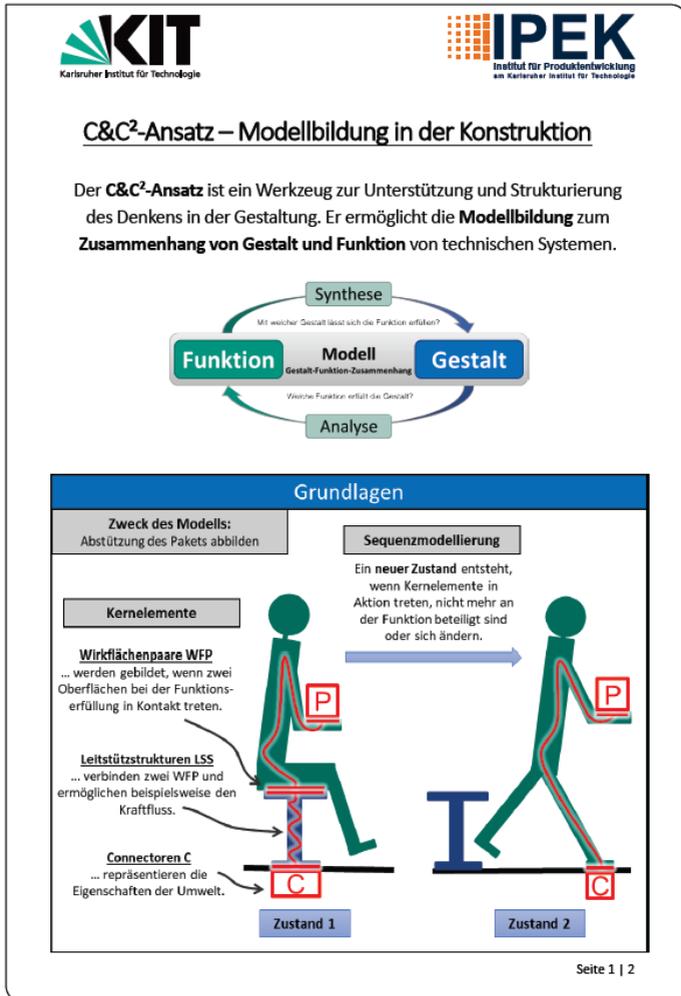


Abbildung A.2.1: Merkblatt für die Einführung der Modellbildung mit C&C²-A Teil 1

Modellbildung in der Analyse	
a) Zweck der Modellbildung notieren	
Was soll das Modell abbilden? Verständnis dafür erzeugen, welcher Teil der Gestalt wie mit der erfüllten Funktion zusammenhängt.	<p>Zweck des Modells: Analyse: Warum geht die Schraube ins Blech und welche konstruktiven Details sind daran beteiligt?</p>
b) Systemgrenze in Raum und Zeit festlegen	
Welcher Ausschnitt des Systems wird betrachtet? Welche Zustände sind relevant?	
c) System bei der Funktionserfüllung abbilden	
Wie kann ich die Gestaltfunktionselemente erkennbar machen? Skizze, CAD Querschnitt, Schließbild,...	
d) Fluss der Systemgrößen verfolgen	
Kraftfluss verfolgen (gedanklich, im Kopf)	
e) Gestaltfunktionselemente im Systemabbild darstellen	
WFP Schraube/Blech, LSS und C (Umgebung) identifizieren und im C&C ² -Modell darstellen	
f) Funktionsrelevante Gestaltparameter identifizieren	
Parameter in WFP, LSS und C finden, durch die die Funktion beeinflusst wird.	
g) Modell verifizieren	
Abgleich mit der Realität, Überprüfung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge	

Abbildung A.2.2: Merkblatt für die Einführung der Modellbildung mit C&C²-A Teil 2

A.2.2 Methoden-Templete für die Modellbildung mit C&C²-A

<p>b) Systemgrenze in Raum und Zeit festlegen</p> <p>Benennen Sie funktionsrelevante Zustände des Systems.</p> <p>Beschreiben Sie die Systemgrenze oder skizzieren Sie, welchen Anteil des Systems Sie weiter betrachten möchten.</p> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; height: 150px; margin-top: 10px;"></div>
<p>c) System bei der Funktionserfüllung abbilden</p> <p>In welchem Systemabbild werden die funktionsrelevanten Elemente erkennbar?</p> <p>Skizzieren Sie eine Ansicht, die Sie für geeignet halten.</p> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; height: 150px; margin-top: 10px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"></div>

Abbildung A.2.3: Methoden-Templete für die Modellbildung mit C&C²-A Teil 1

<p>d) + e) Fluss der Systemgrößen + Gestaltfunktionselemente</p> <p>Wie verläuft der Fluss der Systemgrößen?</p> <p>Stellen Sie die Gestaltfunktionselemente des C&C²-Ansatzes im Systemabbild dar.</p> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; height: 150px; margin-top: 10px;"></div>			
<p>f) Funktionsrelevante Gestaltparameter identifizieren</p> <p>Identifizieren Sie funktionsrelevante Gestaltparameter.</p> <table border="1" style="width: 100%;"><tr><td style="width: 50%; padding: 10px;"><p>Beschreibung funktionsrelevanter Gestaltparameter</p></td><td style="width: 50%; padding: 10px;"><p>Systemabbild mit Gestaltfunktionselementen</p></td></tr></table>		<p>Beschreibung funktionsrelevanter Gestaltparameter</p>	<p>Systemabbild mit Gestaltfunktionselementen</p>
<p>Beschreibung funktionsrelevanter Gestaltparameter</p>	<p>Systemabbild mit Gestaltfunktionselementen</p>		

Abbildung A.2.4: Methoden-Template für die Modellbildung mit C&C²-A Teil 2

A.2.3 Statistische Analyse in der quantitativen Studie

Die Auswahl der durchzuführenden Tests erfolgte auf Grundlage einer Prüfung der Normalverteilung innerhalb der Stichprobe und der Skalierung der zu analysierenden Variable. Durch den Kolmogorov-Smirnov Test wurde festgestellt, dass die Daten in der Stichprobe nicht normalverteilt sind, weshalb für die weitere Analyse nicht-parametrische Tests genutzt wurden. Für alle Tests zur Prüfung einer Auswirkung wurde ein Signifikanzniveau von $p = 0,05$ festgelegt.

Tabelle A.2.2: Übersicht zur statistischen Analyse der erhobenen Daten in der quantitativen Studie

Ziel der Analyse	Analyse		
	Variable(n)	Skalierung	Statistischer Test
Normalverteilung prüfen	Alle	intervall- und nominalskaliert	Kolmogorov-Smirnov
Einfluss der Durchgänge und Gruppenzuteilung prüfen	Punktzahl Systembewertung	intervallskaliert	Mann-Whitney U
Einfluss der Modellbildung auf Verständnis auf <i>Systemebene</i> prüfen	Punktzahl Systembewertung	intervallskaliert	Wilcoxon Test
Einfluss der Modellbildung auf Verständnis auf <i>Detailebene</i> prüfen			
<ul style="list-style-type: none"> • Zustände 	Kategorie der Multiple Choice Antwort	nominalskaliert	Exakter Test nach Fisher, Pearson χ^2 Test
<ul style="list-style-type: none"> • Gestalt 	Kategorie der Zuordnung aus Imagemap		
Auswirkung des Stimulus prüfen	Punktzahl Systembewertung spezifisch für Stimulus	intervallskaliert	Mann-Whitney U

Der Datensatz eines Teilnehmenden wurde aufgrund eingeschränkter Leistungsfähigkeit aus Gründen des Wohlbefindens (Studierender im ersten Durchgang) von der Analyse ausgeschlossen. Somit gehen insgesamt 35 Teilnehmer (N = 35) mit je zwei Datensätzen (Kontroll- und Testgruppe) in die statistischen Analysen ein. Der Vergleich der Gruppen A und B, denen die Teilnehmer zufällig zugeordnet wurden, zeigt keinen signifikanten Unterschied. Ein Vergleich des ersten Durchgangs (Studierende des KIT) mit dem zweiten Durchgang (wissenschaftliche Assistenten der TU Darmstadt) zeigt ebenfalls keinen signifikanten Unterschied.

Um mögliche Einflüsse aus der Zuteilung der Teilnehmer in die Gruppen A und B auszuschließen, wird ein Mann-Whitney U Test für unabhängige Stichproben durchgeführt. Auf diese Weise kann geprüft werden, ob die randomisierte Zuweisung valide erfolgt ist. Zusätzlich wurde geprüft, ob signifikante Unterschiede zwischen den beiden Durchgängen festgestellt werden können, was auf einen Einfluss der Teilnehmergruppe (also Studierende in Durchgang 1 und Doktoranden in Durchgang 2) hindeuten könnte. Zwei weitere Mann-Whitney U Tests wurden spezifisch für jeden der beiden Stimuli durchgeführt, um den Einfluss des zu analysierenden technischen Systems auf das Systemverständnis auf Systemebene zu prüfen.

Für die Prüfung der Auswirkungen der Methodenanwendung auf das Systemverständnis auf Systemebene wurde ein Wilcoxon Test verwendet, da es sich um eine gekoppelte Stichprobe handelt. Hintergrund ist, dass für den Test Daten aus Kontroll- und Testgruppe miteinander verglichen wurden und alle Teilnehmer Teil beider Gruppen waren. Für die nominalskalierten Variablen zum Systemverständnis auf Detailebene wurde der exakte Test nach Fisher verwendet, da in einigen Kategorien zu wenige Datenpunkte für die Anwendung des Pearson-Chi²-Tests gesammelt werden konnten.

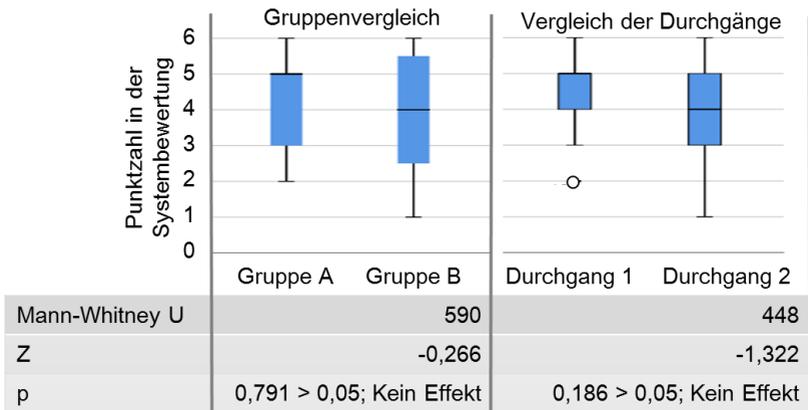


Abbildung A.2.5: Ergebnisse des Mann-Whitney U Tests zum Einfluss der Gruppenzuteilung und der Durchgänge in der im Rahmen der zweiten deskriptiven Studie durchgeführten quantitativen Studie (Kapitel 7.3) zur Untersuchung der Wirksamkeit der Modellbildung mit C&C²-A auf das Systemverständnis in der Analyse. Es ist erkennbar, dass weder die Zuordnung in die Gruppen A und B noch der jeweilige Durchgang der Studie einen signifikanten Einfluss aufweist.

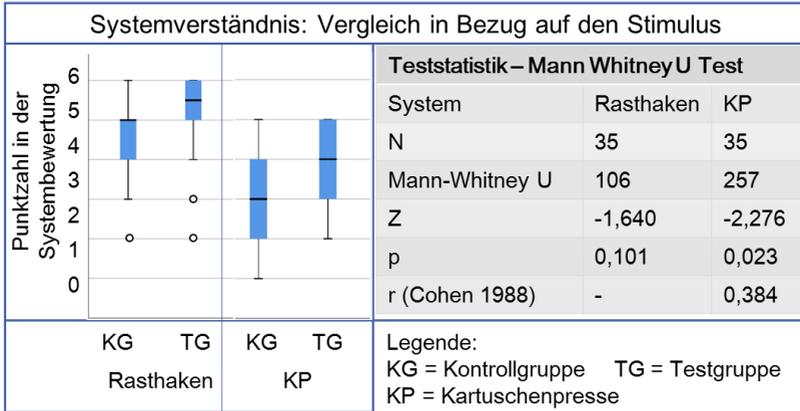


Abbildung A.2.6: Ergebnisse des Mann-Whitney U Tests zum Einfluss des Stimulus auf die Wirksamkeit in Bezug auf das Verständnis auf Systemebene. Es ist erkennbar, dass bei einer Trennung nach Stimulus kein signifikanter Effekt für das Stimulus „Rasthaken“ besteht, wohingegen beim Stimulus „Kartuschenpresse“ ein mittlerer Effekt durch die Methodenschulung besteht.