



Institut für Konstruktionstechnik
und Technisches Design
Universität Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. H. Binz

Clemens Honold

**Methodische Unterstützung der frühen
Phasen der interdisziplinären Planung
adaptiver Tragwerke**

Bericht Nr. 718

Methodische Unterstützung der frühen Phasen der interdisziplinären Planung adaptiver Tragwerke

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der
Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von

Clemens Honold, M.Sc.

geboren in Waiblingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Oliver Sawodny

Tag der mündlichen Prüfung: 19.07.2023

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
Universität Stuttgart

2023

D 93

ISBN-13: 978-3-946924-29-6

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon: +49 (0)711 685-66055

Telefax: +49 (0)711 685-66219

E-Mail: mail@iktd.uni-stuttgart.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) der Universität Stuttgart unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz. Die Arbeit ist zum Teil das Ergebnis des Teilprojekts A01 „Entwicklung von Planungs-, Entwurfs- und Konstruktionsmethoden für adaptive Bauwerke“ des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs 1244 „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz danke ich insbesondere für die Betreuung der Arbeit, die Möglichkeit, an diesem visionären Forschungsprojekt mitzuwirken, und die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Oliver Sawodny danke ich für die Bereitschaft zur Übernahme des Mitherrichts.

Die angenehme Arbeitsatmosphäre und die besondere Zusammenarbeit mit den Kolleginnen und Kollegen des IKTD sowie die dabei entstandenen Freundschaften bleiben mir besonders in Erinnerung. Mein Dank gilt auch den Kolleginnen und Kollegen des Sonderforschungsbereichs, die durch die Zusammenarbeit vielseitige Einblicke in ihre jeweilige Disziplin ermöglichten und einen wichtigen Beitrag zur Erfüllung der Zielsetzung der Arbeit beitrugen. Besonders die Zusammenarbeit innerhalb des Teilprojekts mit Architektin Sophia Leistner vom Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek, ermöglichte das Zusammenführen der Vorgehensweisen des Bauwesens und des Maschinenbaus. Daneben danke ich allen Evaluationspartnern für die konstruktive Zusammenarbeit und das hilfreiche Feedback sowie den Studierenden, die tatkräftig im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte zum Gelingen der Forschungsergebnisse beigetragen haben.

Für die Durchsicht der Arbeit und die nützlichen Hinweise möchte ich mich bei meiner Schwester Carolin Honold, Michael Voigt, Dr.-Ing. Thorsten Herrmann und Dr.-Ing. Daniel Roth bedanken.

Der größte Dank gebührt meiner Familie. Die immerwährende Unterstützung und das Vertrauen meiner Eltern hat den Weg zur Promotion ermöglicht und die andauernde Geduld und das Verständnis meiner Frau Isabel hat einen wesentlichen Beitrag für den erfolgreichen Abschluss geleistet.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Abstract	VII
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung	6
1.3 Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen der Arbeit	11
2.1 Begriffsdefinitionen	12
2.1.1 Mechatronische Systeme und Adaptronik	12
2.1.2 Planen, Entwickeln und Entwerfen	13
2.1.3 Bestandteile systematischen Vorgehens	16
2.1.4 Abgrenzung von Multi-, Inter- und Transdisziplinarität	18
2.1.5 Systems Engineering und Model-Based Systems Engineering ...	19
2.2 Grundlagen der methodischen Produktentwicklung	19
2.2.1 Ziele von methodischen Vorgehensweisen	20
2.2.2 Vorgehensmodelle der Produktentwicklung	21
2.2.2.1 VDI 2221 bzw. Entwicklungs- und Konstruktions-	
prozess nach Pahl/Beitz	22
2.2.2.2 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme	25
2.2.2.3 W-Modell für die Entwicklung adaptronischer Systeme	27
2.2.2.4 Fazit zu den vorgestellten Vorgehensmodellen	28
2.2.3 Abgrenzung von Produktentwicklungsprozessen	29
2.2.4 Hauptschritte der Problemlösung	29
2.2.5 Methodeneinsatz in der Produktentwicklung	31
2.2.6 Lösungsansatz der integrierten Produktentwicklung	32
2.3 Grundlagen zur Gebäudeplanung	33
2.3.1 Ansatz der traditionellen sequenziellen Planung	34
2.3.2 Ansatz der integralen Planung	37
2.3.2.1 Integrated Project Delivery	37
2.3.2.2 Bauteam-Ansatz	38
2.3.3 Erhebung des typischen Vorgehens in der Gebäudeplanung	
als Prozessmodell	39
2.3.4 Definition des Building Information Modeling und der	
MacLeamy-Kurve	43

2.4	Interdisziplinärer Vergleich von Vorgehensmodellen	44
2.5	Grundlagen zur Prozessentwicklung	45
2.5.1	Vorgehensmodelle basierend auf Phasen und Aktivitäten	46
2.5.2	Klassifizierung von Prozessmodellen	46
2.5.3	Ablauforganisatorische Integration von Aktivitäten	47
2.5.4	Ansätze zur Modellierung von Prozessen	48
2.6	Grundlagen zum Requirements Engineering	49
2.6.1	Requirements Engineering in der Produktentwicklung	50
2.6.1.1	Aktivitäten des Requirements Engineerings	50
2.6.1.2	Methoden und Werkzeuge des Requirements Engineering.....	51
2.6.2	Requirements Engineering in der Bauplanung	52
2.7	Bewertung der Umweltwirkungen von Produktlebenszyklen.....	54
2.8	Sicherheit und Zuverlässigkeit bei technischen Systemen und im Ingenieurbau.....	55
2.8.1	Begriffsdefinitionen von Eigenschaften baulicher Anlagen.....	55
2.8.2	Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit und Zuverlässigkeit als Planungsbestandteil.....	55
2.9	Studie zum Methodentransfer für die Hochbauplanung	56
2.10	Literaturbasierte Herausforderungen in der Bauplanung	58
2.11	Gegenüberstellung der Branchen Bauwesen und Maschinenbau	59
3	Stand der Forschung bzw. Technik adaptiver Gebäude.....	63
3.1	Energetische Bilanz adaptiver Gebäude.....	63
3.2	Designprozess für adaptive Systeme nach Senatore	64
3.3	Abgrenzung adaptiver Systeme.....	65
3.4	Beispiel- bzw. Konstruktionskatalog adaptiver Strukturen	65
4	Konkretisierung der Aufgabenstellung.....	67
4.1	Bewertung der vorgestellten Grundlagen	67
4.2	Konkretisierung der Zielsetzung und weiterer Forschungsfragen	70
4.3	Abgrenzung und berücksichtigte Randbedingungen der Arbeit	73
4.4	Hinweise zur Evaluation	74
5	Planung des Experimentalhochhauses des SFB 1244.....	77
5.1	Vorgehensweise während der Planung	77
5.2	Entwicklung der integrierten Aktorik.....	81
5.2.1	Vorgehensweise bei der Entwicklung.....	81
5.2.2	Konzeption der integrierten Aktorik	82
5.2.3	Adaptions- und Wirkprinzipien.....	84

5.2.4	Konstruktionsbeschreibung und Realisierung eines Funktionsprototypen.....	86
5.3	Herausforderungen und Erkenntnisse der Planung	86
6	Anforderungen an den Planungsprozess und die methodische Unterstützung ...	91
6.1	Vorgehensweise zur Erhebung der Anforderungen	91
6.2	Identifikation des Unterstützungsbedarfs	92
6.3	Definition und Klassifikation der Anforderungen	93
6.4	Evaluation der Anforderungen	96
6.4.1	Zielsetzung und Vorgehen der Evaluation.....	96
6.4.2	Diskussion der Evaluationsergebnisse.....	96
7	Methodenbaukasten für die Planung adaptiver Gebäude	99
7.1	Vorgehensweise zur Erarbeitung des Methodenbaukastens	99
7.2	Ziel- und Anforderungsdefinition für den Methodenbaukasten.....	100
7.3	Erfassung der Methoden mit Steckbriefen.....	101
7.4	Ermittlung eines geeigneten Darstellungs- und Auswahlkonzepts.....	102
7.5	Entwicklung einer Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden.....	104
7.6	Evaluation der Konzeption des Methodenbaukastens	105
7.6.1	Vorgehen und Zielsetzung der Evaluation.....	105
7.6.2	Diskussion der Evaluationsergebnisse.....	106
8	Prozess für die Planung adaptiver Tragwerke.....	109
8.1	Ansatz und Vorgehensweise der Erarbeitung der Unterstützung	109
8.2	Kernaktivitäten des Prozesses.....	109
8.2.1	Abgrenzung der Disziplinen des Planungsprozesses.....	111
8.2.2	Abgrenzung von Phasen des Planungsprozesses	114
8.3	Vernetzung von Planungsaktivitäten und Methoden.....	118
8.3.1	Konzept des entwickelten integrierten Methodenbaukastens....	118
8.3.2	Methoden und Werkzeuge des Planungsprozesses	119
8.3.3	Integration der LCA in den Planungsprozess	120
8.3.4	Integration des Sicherheitskonzepts in den Planungsprozess ..	127
8.4	Requirements Engineering Konzept für die Planung adaptiver Systeme	129
8.4.1	Prozessuale Integration des Requirements Engineering in die Planung	129
8.4.2	Webapp zur Unterstützung des Requirements Engineerings	130
8.4.3	Sammlung von Hauptmerkmalen zur Identifikation von Anforderungen	132
8.5	Multidisziplinäre Bewertung adaptiver Tragwerkskonzepte	135

8.6	Abbildung des Planungsvorgehens als Vorgehensmodell	138
8.6.1	Gegenüberstellung des Prozesses zu bestehenden Vorgehensmodellen	138
8.6.2	Transfer des W-Modells für den entwickelten Planungsansatz	140
8.7	Evaluation des Prozesses.....	142
8.7.1	Zielsetzung und Vorgehen der Evaluation.....	142
8.7.2	Diskussion der Evaluationsergebnisse.....	143
8.7.2.1	Integration der LCA-Methodik.....	143
8.7.2.2	Prozess für die Planung adaptiver Tragwerkssysteme	145
8.7.2.3	Vernetzung von Methoden und Prozess	148
8.7.2.4	Requirements Engineering Ansatz	149
8.7.2.5	Bewertungsansatz	151
8.7.2.6	Übergreifendes Fazit der Evaluationspartner.....	153
8.7.2.7	Ausblick aus Sicht der Evaluationspartner.....	154
8.7.3	Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse.....	155
9	Zusammenfassung.....	157
10	Ausblick.....	159
	Literaturverzeichnis.....	163
	Anhang	181
A.1	Stuttgart SmartShell.....	181
A.2	Leistungsbild der Tragwerksplanung	182
A.3	Darstellungsarten von Abläufen.....	183
A.4	Hauptmerkmale nach Pahl und Beitz.....	184
A.5	Fragebogen zur Evaluation der Ergebnisse.....	185
A.6	Leistungsdiagramm verschiedener Akteure.....	188
A.7	Ansatz eines Konstruktionskatalogs für Wirkprinzipien.....	189
A.8	Abbildung Funktionsprototyp der Aktorik	190
A.9	Formblatt zur Evaluation der Anforderungsdefinition	191
A.10	Steckbriefe zu neuentwickelten bzw. transferierten Methoden	192
A.11	Darstellungs- und Auswahlkonzepte für Methodenbaukästen	195
A.12	Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden	197
A.13	Informationsflüsse bei der Anwendung der Methodik zur Reduktion von Umweltwirkungen bei der Planung adaptiver Gebäude	198
A.14	Evaluationsergebnisse zur Methodenlandkarte für Produkt- entwicklungsmethoden	199
A.15	Evaluationsergebnisse „Webbasierte Anforderungslisten“	200
A.16	Potenzialkriterien für adaptive Tragwerke.....	202

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

AIA	American Institute of Architecture
ad.	adaptiv
AT	Aufgabenteilung
BIM	Building Information Modeling (dt. Gebäude- bzw. Bauwerksinformationsmodell)
CE	Concurrent Engineering (dt. Aufteilen einer Aufgabe auf mehrere Personen)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DS 1	Descriptive Study 1 (dt. Deskriptive Studie 1, d. h. Stand der Forschung)
DRM	Design Research Methodology (dt. Forschungsmethodik für die Produktentwicklung)
EN	Europäische Norm
Entw.	(Neu-)Entwicklung
Erpr.	Erprobung
EV	Evaluation
FF	Forschungsfrage
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
Geb.	Gebäude
Grl.	Grundlagen
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
Hrsg.	Herausgeber
IKTD	Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
IPD	Integrated Project Delivery (dt. Integrierte Projektabwicklung)
ISO	International Organization for Standardization
Kap.	Kapitel

Konz.	Konzeption
LCA	Life Cycle Assessment (dt. Lebenszyklusanalyse)
LPH	Leistungsphase
PKW	Personenkraftwagen
PS	Prescriptive Study (dt. präskriptive Studie, d. h. Entwicklung der eigenen Lösung)
QFD	Quality Function Deployment (Methode zur Umsetzung von Kundenwünschen)
RS	Research Clarification (dt. Forschungserläuterung, d. h. Forschungsplanung)
SE	Simultaneous Engineering (dt. Überlapptes und paralleles Ausführen unterschiedlicher Aktivitäten)
SFB 1244	Sonderforschungsbereich 1244 an der Universität Stuttgart
tlw.	teilweise
u.	und
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Z & A	Zusammenführung und Abgleich

Abstract

Adaptive buildings represent an approach to reduce the immense material and energy demand of buildings during the whole life cycle. By integrating adaptive elements in the support structure or the building skin like façade elements, the building is enabled to respond to external influences. Using the example of adaptive support structures, small displacements in the load path generated by controlled actuators allow the reduction of peak stresses and damping of oscillations of dynamic loads, which can be induced by wind loads, earthquakes, or variable payloads. The Stuttgart SmartShell has already proven that this construction method can save significant resources compared to conventional building. For further research, the Collaborative Research Center 1244 "Adaptive skins and structures for the built environment of tomorrow" was established at the University of Stuttgart. Part of the project is the planning and construction of the first adaptive high-rise building for experimental testing of adaptive structures and façades.

The planning and development of adaptive elements significantly extends the planning process of buildings due to additional activities and requirements to be considered. In particular, a previously unknown collaboration between the disciplines of architecture, structural engineering and mechanical engineering as well as their respective competences arises. Consequently, a common procedure considering the main participants of planning adaptive buildings and methodical support for complex tasks is required.

This contribution as part of the Collaborative Research Center is dealing with the question of how the interdisciplinary planning of adaptive buildings can be structured and supported by methods and processes. Thereby, the focus is set on supporting the planning of adaptive structures. The answer is given from the point of view of the methodical product development by aiming at evaluating and utilizing the potential of a transfer of methods established in product development.

First, the current state of research in this context from architecture and product development is presented. This includes the presentation of development and planning processes, basics of process development, relevant methods, and a comprehension of the relevant state of research on adaptive buildings. Subsequently, the planning procedure for the experimental high-rise building including the development of the adaptive structural columns and bracing elements will be explained. Based on the description of challenges that occurred during planning from the point of view of those involved, requirements for the process and methodical support to be developed are derived.

The final result is a planning process that proposes a step-by-step procedure, assigning the required activities to plan adaptive support structures to the necessary disciplines, and showing the corresponding interfaces. A method toolbox is being integrated into the process, which proposes methods for the respective activities. The methods have already been tested in the context of the experimental high-rise building or have been transferred afterwards for future application. The process is divided in different stages. The focus is set on early phases, when essential decisions are taken regarding the concept to be followed. As an addition, the developed process was transferred from the process representation to a generalized process model in the form of a W-model. In an abstract form, this model reflects the planning procedure and relevant process stages.

The methodical support is composed of several modules. An approach for the requirements engineering is used to support the definition of requirements and the subsequent requirements management. For this purpose, a dedicated web app was developed for the cross-discipline management of requirements, as well as a list of criteria to support a definition of requirements as complete as possible. The integration of the life cycle assessment of adaptive load-bearing concepts into the planning process enables the systematic identification of the project-specific potential of this construction method. A proposal for the integration of the safety concept explains how to develop a fail-safe design during the elaboration of the solution concept stepwise. Furthermore, a multidisciplinary evaluation approach is proposed to determine a solution concept at the end of the concept stage by identifying a favorite, based on criteria of the disciplines involved.

As a basis for the method toolbox, concepts were identified and evaluated that serve to collect and represent methods and are also suitable for the purposeful method selection. This investigation also led to a method map for product development methods as a basis for the transfer of further methods. This map illustrates the variety and versatility of existing product development methods at a glance.

To ensure correctness and the added value of this contribution, the developed methodical support was finally evaluated. For this purpose, the results were presented to nine participants of the Collaborative Research Center as well as to external planners of the experimental high-rise building and questioned regarding the support potential for future applications. The partly discipline-specific feedback confirms the support provided by the results and is discussed comprehensively. Part of the conclusion is an outlook with possible follow-up research work, including a reference on the extension of the support to adaptive building skins.

1 Einführung

Das Bauen erfordert einen Wandel: Weltweit steht das Bauwesen für 60 % des Ressourcenverbrauchs, für jeweils ca. 40 % des Energieverbrauchs und der Emissionen sowie zumindest in Deutschland für ca. 60 % des Massenmüllaufkommens [SOBEK16A, S. 158; CURBACH13, S. 751; UNEP09, S. 6 f.]. Global betrachtet verursacht allein die Herstellung von Zement einen höheren Ausstoß an Kohlenstoffdioxid als der Luftverkehr [VDI ZRE14, S. 9]. Daneben leben nach Prognosen der Vereinten Nationen im Jahr 2055 über 10 Milliarden Menschen auf der Erde [UN17], was einem Plus von 28 % im Vergleich zum Jahr 2020 entspricht. In den nächsten Jahrzehnten ist daher zusätzlicher Lebensraum für 2,2 Milliarden Menschen zu schaffen, der verträglich mit unserer Umwelt ist.

Sand und Kies sind gemessen an der Masse die bedeutendsten Bestandteile von Beton und nach Wasser die weltweit meistverbrauchten Stoffe [CURBACH13, S. 751]. Diese werden bereits in weit größerer Menge abgebaut, als sich diese auf natürliche Weise erneuern können [UNEP14, S. 1]. Mit bisherigen Mitteln und Methoden sind die mit den anstehenden Bauaufgaben notwendigen Massenströme voraussichtlich nicht zu bewältigen [SOBEK14A, S. 784]. Folglich werden ressourcen- und energieeffiziente Bauweisen benötigt, die drastisch weniger Kohlenstoffdioxid und andere Schadstoffe in die Umwelt freisetzen [CURBACH13, S. 751]. Zudem gewinnt der Leichtbau, der im Bauwesen im Vergleich zu anderen Branchen bislang eine untergeordnete Rolle einnimmt [KLEIN13, S. 9], zusammen mit der Recyclingfähigkeit von Bauwerken an bedeutender Relevanz [SOBEK14A, S. 784]. Weltweit werden bereits verschiedene Ansätze verfolgt, um die Ziele effizienter und schadstoffarmer Bauweisen zu erreichen [CURBACH13, S. 751].

Diese bestehenden Ansätze haben mit der konventionellen Bauweise gemeinsam, dass die verwendeten Komponenten zu Tragstrukturen und Gebäudehüllen mit statischen Systemeigenschaften führen und nicht auf äußere Einflussgrößen wie Windlasten, Erdbebenschwingungen oder klimatische Veränderungen wie Temperaturschwankungen reagieren können. Das hat zur Folge, dass Tragsysteme für die ungünstigste Kombination von Lastfällen [DIN EN 1990 2010, S. 35] bemessen werden, die im Lebenszyklus äußerst selten oder nie eintreten, wodurch eine Überdimensionierung resultiert [Weidner19, S. 1]. Durch die Integration von Sensor-Aktor-Systemen in die Tragstruktur lässt sich durch kleine Verschiebungen oder gezielte Veränderungen von Systemeigenschaften der Lastabtrag so beeinflussen, dass durch Nutzlasten, Winde oder Erdbeben induzierte Schwingungen gedämpft sowie beispielsweise auch durch Temperaturschwankungen

kungen resultierende Spannungsspitzen mittels Homogenisierung des Lastabtrags vermindert werden können. Folglich lassen sich Bemessungsquerschnitte in einem neuen Maßstab reduzieren und Baumaterialien einsparen. [vgl. SOBEK16A, S. 157 ff.]

Die Stuttgart SmartShell (vgl. Anhang A.1) stellt das erste adaptive Schalentragerwerk dar, bei dem die Integration von Sensor-Aktor-Systemen erfolversprechend umgesetzt wurde. Im Vergleich zu einer konventionell ausgelegten Schalenkonstruktion konnten bei diesem Beispiel 70 % an Materialmengen eingespart werden [SOBEK14A, S. 788].

Ein weiteres Anwendungsfeld adaptiver Systeme im Bauwesen stellen adaptive Gebäudehüllen dar [HAASE11A, S. 69 ff.]. Auch konventionelle Gebäudehüllen weisen ein statisches Verhalten auf, obwohl diese vielseitigen Einwirkungen von außen und dem Gebäudeinneren ausgesetzt sind [SOBEK14B, S. 506]. Durch die Integration adaptiver Systeme in die Gebäudehülle steht das Innere des Gebäudes mit dessen Umgebung in Wechselwirkung, um insbesondere den Energiebedarf während der Nutzung zu reduzieren als auch den Komfort beim Aufenthalt im Inneren des Gebäudes zu erhöhen [HAASE11B, S. 69]. So ermöglicht eine Gebäudehülle mit einer adaptiven Luftdurchlässigkeit einen dezentralen und ortsbezogenen bedarfsgerechten Luftaustausch ohne energieaufwändige Lüftungstechnik [KNUBBEN14, S. 46 ff.]. Eine schaltbare Dämmung bewirkt eine energiearme Wärmeregulierung durch die Nutzung natürlicher Ressourcen, indem z. B. in Sommernächten im Inneren aufgestaute Wärme durch die tagsüber isolierende Gebäudehülle entweichen kann [KNUBBEN14, S. 17]. Schaltbare Gläser ermöglichen die Regelung des Licht- und Energieeintrags in das Gebäudeinnere [HAASE14, S. 293 ff.]. Im Vergleich zu konventionellen Sonnenschutzsystemen lässt sich durch eine punktuelle, bedarfsgeregelte Verschattung von Fensterflächen Blendfreiheit gewährleisten, ohne ganze Räume zu verdunkeln, und die solare Strahlung zur natürlichen Erwärmung des Inneren nutzen. Die schematische Darstellung in Bild 1.1 veranschaulicht potenzielle Ansätze zur Integration adaptiver Systeme in die Tragstruktur und die Gebäudehülle, die zur Funktionalität adaptiver Gebäude bzw. Bauwerke beitragen.

Adaptive Systeme sind zentraler Bestandteil des Sonderforschungsbereichs SFB 1244 mit dem Titel „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ an der Universität Stuttgart. Im Rahmen des Projekts erfolgt die Planung und Inbetriebnahme eines knapp 37 Meter hohen Experimentalhochhauses, dem weltweit ersten adaptiven Hochhaus, das für Forschungszwecke konzipiert ist. [SFB1244 2021]

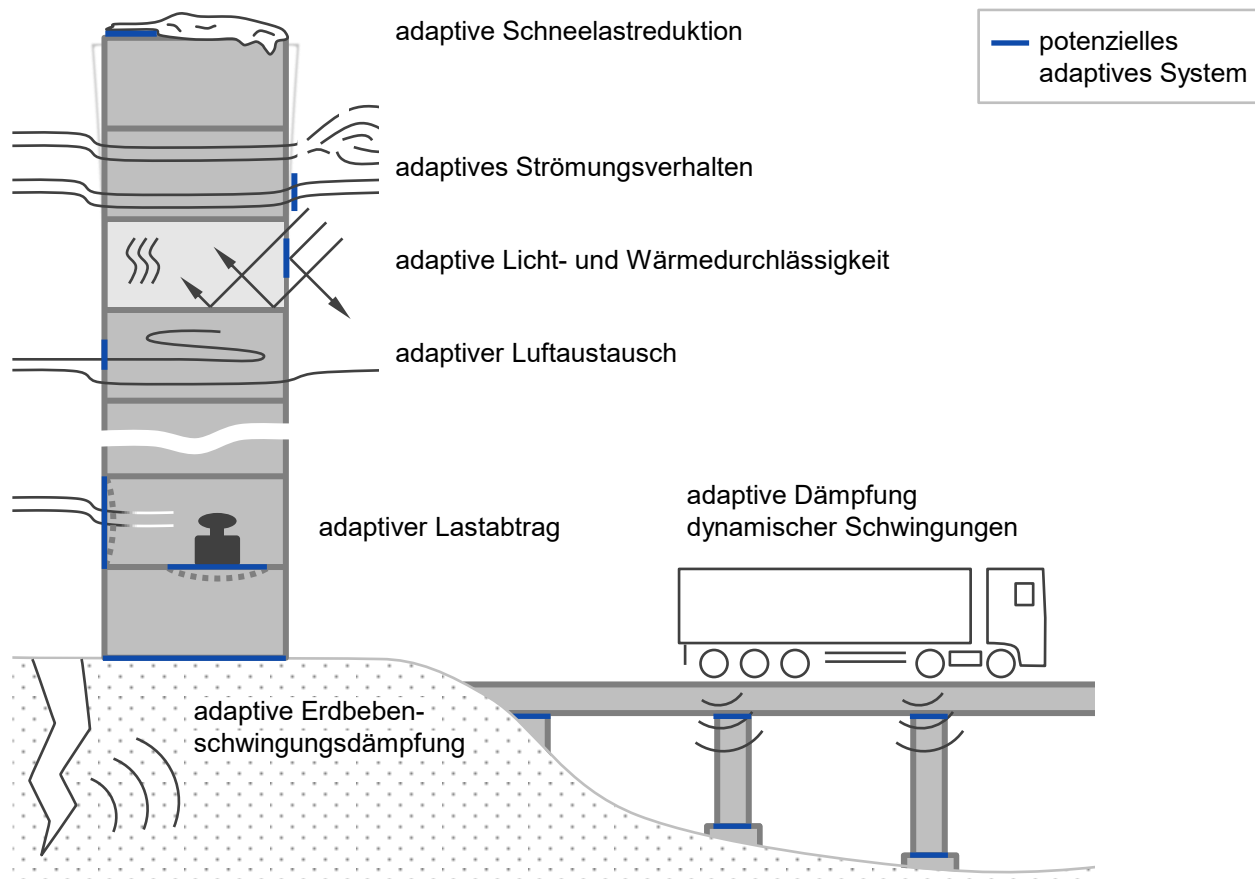


Bild 1.1: Potenzielle Sensor-Aktor Systeme in Tragstrukturen und Gebäudehüllen [vgl. HONOLD17B, S. 3]

1.1 Problemstellung

Im Vergleich zu konventionellen Gebäuden erfährt die Planung adaptiver Tragstrukturen bzw. Gebäudehüllen eine substanzielle Erweiterung von fachlichen Aspekten sowie des Planungsaufwands, da bestehende Planungsaufgaben zum Teil grundlegend erweitert werden und neue Herausforderungen zu bewältigen sind [vgl. HONOLD17A]. Dabei werden im Bauwesen bisher nicht benötigte Kompetenzen aus dem Bereich des Maschinenbaus insbesondere zur Steuerung und Regelung, Auswahl und konstruktiven Integration der Aktoren sowie zur Entwicklung der Anlagentechnik erforderlich [vgl. SENATORE19, S. 850 f.; HONOLD17A, S. 137].

Adaptive Systeme bedingen daher einen grundlegenden Wandel der architektonischen Konzeption von Gebäuden [WEIDNER18, S. 110]. Während der Planung bzw. des Entwurfs muss sich die Architektur der Herausforderung stellen, die Vorteile adaptiver Systeme im architektonischen Gebäudeentwurf zu verwirklichen [Leistner20, S. 2 ff.]. Der Leichtbau mit adaptiven Systemen löst das einer konventionellen Tragstruktur meist eindeutig zugrunde gelegte Belastungsszenario auf und führt zum Verlust des formbe-

stimmenden Lastfalls, der bislang die Gestalt eines Tragwerks prägt, sodass klassische Formfindungsverfahren an die Grenzen der Anwendbarkeit stoßen [SOBEK16A, S. 160; SOBEK16B, S. 76]. Während der Realisierung des Gebäudes sind die Systeme in Betrieb zu nehmen und daraufhin fortlaufend die zuverlässige Funktion der Komponenten sicherzustellen. Entsprechend wirkt sich die Integration adaptiver Systeme auf alle Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes aus [HONOLD17A S. 132].

Folglich erfordern adaptive Systeme während der Planung die zentrale Berücksichtigung vielseitiger Anforderungen aus dem gesamten Lebenszyklus, wobei die Ressourceneffizienz, über alle Phasen hinweg betrachtet, den entscheidenden Unterschied zu konventionellen Lösungen aufzeigen muss. Zu den zu berücksichtigenden Aspekten zählen insbesondere die Nachhaltigkeit, Sicherheit, Wartung und Instandhaltung. [vgl. TEUFFEL04, S. 72; HONOLD19A, S. 2 ff.]

Durch die vielseitigen Anforderungen und die für die Lösungsfindung auf Disziplinen verteilten erforderlichen Kompetenzen wird für die Planung und den Entwurf adaptiver Systeme eine bisher nicht gekannte Zusammenarbeit zwischen Architektur, Tragwerksplanung, Bauphysik, Systemdynamik, Maschinenbau und weiteren Disziplinen essenziell [HONOLD17A, S. 139]. Mit weiteren im Bauprozess benötigten Disziplinen nehmen allerdings auch die Unterschiede der Beteiligten, die geprägt sind durch jeweils eigene Terminologien, Denkweisen, Methoden, Werkzeuge und Modelle [vgl. SPATH16, S. 4; EISENBART11, S. 344], zu. Bereits heute entstehen bei konventionellen Bauprojekten durch die Zunahme von Planungsbeteiligten Probleme, da deren Schnittstellen weitestgehend undefiniert bleiben [BERGMANN13, S. 51]. Durch den mit adaptiven Systemen verbundenen weiteren Wissenszuwachs und die resultierende Spezialisierung [LANDOWSKI17, S. 1] gewinnen im Gegenzug Maßnahmen zur menschlichen, methodischen, organisatorischen und technischen Integration an Bedeutung [vgl. EHRENSPIEL17, S. 233 ff.]. Dabei liegt nach Ehrlenspiel und Meerkamm die größte Bedeutung in der Bereitschaft zur erfolgreichen Zusammenarbeit der Beteiligten [EHRENSPIEL17, S. 234 f.].

Das konventionelle Planungsvorgehen ist jedoch auch durch Umstände geprägt, welche ein Hinterfragen des bisherigen Vorgehens nahelegen. Während im Lebenszyklus von Gebäuden bislang eine Trennung zwischen den Phasen „Planung - Herstellung - Nutzung/Betrieb - Rückbau/Entsorgung“ mit wechselnden Beteiligten typisch ist [WILLBERG11, S. 8 ff.], verfließen im Kontext adaptiver Gebäude die Phasen aufgrund der durch die projektbegleitend durchgehend erforderlichen Kompetenzen sowie einer bereits während der Realisierung ausgeprägten Inbetriebnahme [vgl. HONOLD17A, S. 31]. Daneben

planen derzeit im Planungsprozess von Gebäuden eingebundene Disziplinen üblicherweise mit jeweils eigenen Modellen parallel zueinander [JULI11, S. 13; BERGMANN13, S. 50] und Prozesse sowie Methoden der integralen Planung werden nur bei höherwertigen Bauprojekten angewandt [vgl. BERGMANN13, S. 123; LINDEMANN05, S. 8] bzw. sind, abweichend zur hohen Bedeutung in anderen Industriezweigen [GRABOWSKI97, S. 36], nicht weitläufig bekannt [ERDELL06, S. 39].

Die adaptiven Funktionen erfordern jedoch auch neue technische Lösungen in Form von in Gebäude integrierbare adaptiven Funktionselementen, die im Experimentalhochhaus erprobt werden. Zur Integration in dessen Tragstruktur geeignete adaptive Systeme existierten zu Beginn der Planungsaktivitäten dieses Forschungsgebäudes nicht [vgl. WEIDNER18, S. 116; BURGHARDT21, S. 64 ff.; BURGHARDT23, S. 68 ff.].

Zusammenfassend stellen adaptive Gebäude durch die vielseitige Komplexität eine planerische Herausforderung dar, deren Problemcharakter es für die zukünftige Durchsetzung des Ansatzes zu lösen gilt. Hierfür ist eine neue Vorgehensweise für die Planung zu entwickeln [WEIDNER18, S. 110]. Für eine systematische interdisziplinäre Planung adaptiver Gebäude kristallisiert sich nachfolgend zusammengefasste Problemstellung heraus:

In Bezug auf die Planung adaptiver Gebäude ist kein Planungsprozess bekannt, der zur Unterstützung eines zielgerichteten Vorgehens und der interdisziplinären Zusammenarbeit Planungsschritte definiert, strukturiert, jeweils geeigneten Disziplinen zuordnet und Abhängigkeiten aufzeigt. Des Weiteren strebt kein Prozess die Erfüllung aller an das Planungsergebnis gestellten Anforderungen und die Berücksichtigung der speziellen Entwurfsaspekte an. Daneben existiert keine Übersicht über Methoden, die die Erarbeitung von Teilergebnissen der Planung adaptiver Tragwerkssysteme unterstützen. Vor der Planung des weltweit ersten adaptiven Hochhauses waren diverse Herausforderungen, Anforderungen und potenzielle konstruktive Lösungen weder bekannt noch absehbar.

Auf Grundlage der erläuterten Problemstellung lässt sich die übergeordnete Forschungsfrage dieser Arbeit formulieren:

Wie lässt sich die interdisziplinäre Planung adaptiver Gebäude strukturieren und mit Hilfe von Methoden und Prozessen unterstützen?

Um diese allgemein formulierte Fragestellung beantworten zu können, werden zu Beginn nachfolgender Kapitel weitere Forschungsfragen abgeleitet, die die Inhalte thematisch

abgrenzen. Die Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage stellt das Ziel dieser Arbeit dar, welches nachfolgend weiter konkretisiert wird.

1.2 Zielsetzung

Methodische Vorgehensweisen sind im Maschinenbau bzw. der Produktentwicklung verbreitet [vgl. GRANER13, S. 3], dienen beim Umgang mit komplexen Sachverhalten als Unterstützung und stellen Vorgehensweisen zur Problemlösung mittels Strukturierung und Zergliederung dar [EHRENSPIEL17, S. 175 f.]. Diese sogenannten Produktentwicklungsmethoden werden als „planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels“ [PAHL07, S. 784] verstanden und unterstützen das Finden guter Lösungen, wodurch das Vorgehen planbar, flexibel, optimierbar und nachprüfbar wird [PAHL07, S. 9; BENDER16, S. 404]. Die methodische Unterstützung fördert dabei die Zielorientierung, wie z. B. die Lösungsfindung und -erarbeitung, als auch die Zusammenarbeit beteiligter Menschen [EHRENSPIEL17, S. 249]. Im Bauwesen fällt der Begriff „Methode“ dagegen vorrangig beispielsweise im Kontext zu statischen Berechnungen (Finite-Element-Methode) oder Methoden zur Formfindung.

Studien [LINDEMANN05; ERDELL06] zeigen das Potenzial auf, dass Methoden der Produktentwicklung bzw. des Maschinenbaus in das Bauwesen übertragen werden können, „da die Problemstellungen und die zur Lösung notwendigen Handlungsschritte gleich“ [LINDEMANN05, S. 28] und in dieser Hinsicht Unterschiede beider Branchen von „untergeordneter Bedeutung“ [LINDEMANN05, S. 51] sind. Steigende Anforderungen an Gebäude und zusätzliche Aufgaben bei der Planung und Konstruktion, wie die zunehmende Berücksichtigung der Nachhaltigkeit, weckt das Bewusstsein in der Baubranche, Prozesse zu verändern [HEIDEMANN14, S. 10 ff.; LINDEMANN05, S. 8]. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit ist zu untersuchen, wie das Potenzial transferierter methodischer Vorgehensweisen im Kontext adaptiver Gebäude sowie bei der Zusammenarbeit der Disziplinen genutzt werden kann. Dazu wird der Ansatz verfolgt, aus dem Blickwinkel der methodischen Produktentwicklung für diese Problemstellung einen Lösungsbeitrag anzubieten.

Bei der Erarbeitung der Ergebnisse sollen die Erkenntnisse der Planung bzw. des Entwurfs des Experimentalhochhauses sowie zugehörigen Forschungsaktivitäten des Sonderforschungsbereichs 1244 Berücksichtigung finden. Das in Bild 1.2 dargestellte Gebäude befand sich zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit im Stadium der Errichtung.



Bild 1.2: Im Planungsstadium visualisiertes Experimentalhochhaus [SFB1244 2021]

Entsprechend dem bisherigen Projektfortschritt und der dadurch bedingten Möglichkeiten der Evaluation von Ergebnissen wird der Fokus innerhalb der Arbeit auf adaptive Tragwerke gelegt. Da Aspekte des Entwurfs von Gebäuden mit adaptiven Systemen in separaten Arbeiten erforscht werden und zunächst Forschungsgegenstand der Architektur darstellen [vgl. LEISTNER20, S. 1 ff.], wird der Schwerpunkt auf die Planung gesetzt. Zur Förderung der Akzeptanz des zu erarbeitenden Vorgehens [vgl. LINDEMANN05, S. 28] und um den Bezug zur Praxis herzustellen, ist anzustreben, im Rahmen der methodischen Unterstützung Bestandteile des konventionellen Planungsvorgehens aufzugreifen. Von der Problemstellung und der übergeordneten Forschungsfrage ausgehend lässt sich die grundlegende Zielsetzung der Arbeit zusammenfassen:

Im Kontext adaptiver Tragwerkssysteme ist ein disziplinenübergreifendes Vorgehen zu erarbeiten, das wesentliche Bestandteile und komplexe Schritte der Planung strukturiert sowie beteiligte Disziplinen vernetzt. Komplexe und bedeutsame Schritte dieses zu entwickelnden Prozesses sollen mit Hilfe existierender, aus der Produktentwicklung transferierter sowie neu entwickelter Methoden unterstützt werden.

Die Zielsetzung ist mit Erkenntnissen von Kapitel 2 und 3 weiter zu konkretisieren.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit berücksichtigt zwei Aspekte: Zur Strukturierung des wissenschaftlichen Vorgehens ist der Aufbau angelehnt an die Design Research Methodology (DRM) nach Blessing und Chakrabarti [BLESSING09]. Diese Forschungsmethodik unterstützt das Forschungsvorgehen und trägt zur Sicherstellung der wissenschaftlichen Güte der Forschungsergebnisse bei [BLESSING09, S. 7 ff.]. Die inhaltliche Strukturierung ist dadurch bedingt, dass aufgrund der Neuheit adaptiver Tragwerke auch an deren Planung erstmals gestellte Anforderungen zu ermitteln sind, die dem Prozess zugrunde gelegt werden. Die Arbeit verfolgt daher nach der Analyse bestehender Grundlagen (Stand der Forschung bzw. Technik, Teil 1) zunächst die Analyse des eigentlichen Unterstützungsbedarfs (Teil 2), auf die dann die Entwicklung der methodischen Unterstützung aufbaut (Teil 3). Den resultierenden Aufbau der Arbeit stellt Bild 1.3 dar.

Im Nachfolgenden werden den Stufen der DRM die Kapitel der Arbeit zugeordnet. Bestandteil der ersten Stufe ist die Analyse der Problemstellung mit dem Ergebnis, die Ziele einschließlich der Forschungsfragen zu definieren [BLESSING09, S. 29 ff.]. Diese sogenannte „Research Clarification“ (RC) ist Bestandteil dieses ersten Kapitels.

In der zweiten Stufe „Descriptive Study 1“ (DS1) wird die bestehende Situation tiefergehend analysiert [BLESSING09, S. 31 ff.] und das Ziel verfolgt, ein grundlegendes Verständnis über das Forschungsfeld [BLESSING09, S. 31 ff.] bzw. für die im Rahmen der Arbeit vorgestellten Ergebnisse aufzubauen. Während sich Kapitel 2 auf die Branchen Maschinenbau/Produktentwicklung und Bauwesen/Architektur sowie deren Prozesse fokussiert, widmet sich Kapitel 3 dem Forschungsfeld adaptiver Gebäude. In Kapitel 4 erfolgt nach einer Zusammenfassung bzw. Bewertung der Grundlagen die Konkretisierung der Zielsetzung und die Ableitung des weiteren Vorgehens.

Die dritte Stufe der DRM, die „Prescriptive Study“ (PS), sieht die eigentliche Entwicklung der Unterstützung vor [Blessing09, S. 33 ff.]. Hierzu wird in Teil 2 der Arbeit zum Verständnis der weiteren Ergebnisse die Planung des Experimentalhochhauses erläutert (Kapitel 5) und eine Anforderungsdefinition an den Planungsprozess und die methodische Unterstützung abgeleitet (Kapitel 6).

Teil 3 der Arbeit befasst sich schließlich mit der Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage und der Erfüllung der abgeleiteten Anforderungen. Aufgeteilt in Kapitel 7 und 8 wird eine Unterstützung zur Lösung der erläuterten Problemstellung vorgestellt.

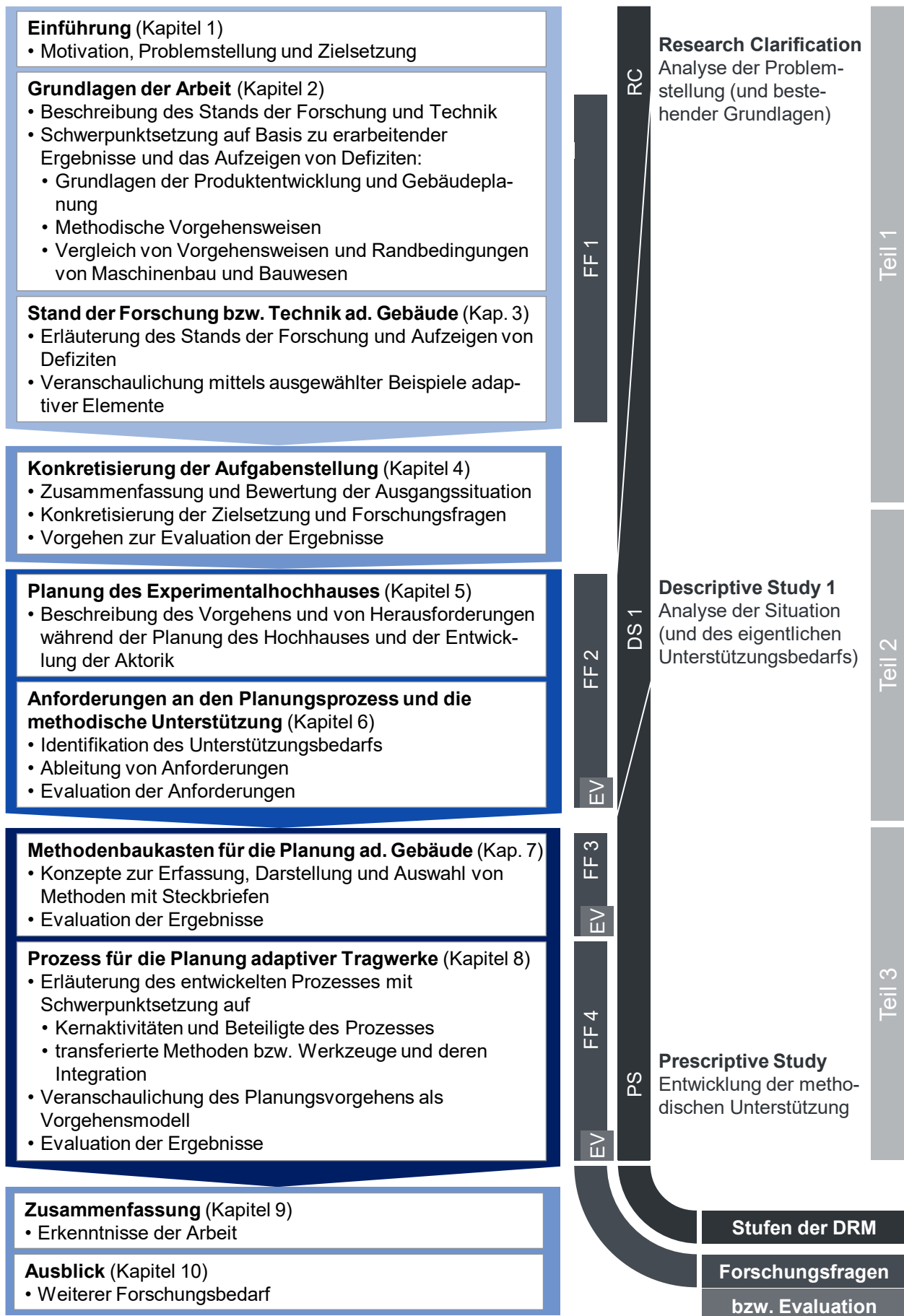


Bild 1.3: Aufbau der Arbeit

Die abschließende vierte Stufe der DRM, bezeichnet als „Descriptive Study 2“ (DS 2), sieht die Evaluation der Ergebnisse hinsichtlich der Korrektheit der Ergebnisse sowie dem Mehrwert der erarbeiteten Unterstützung vor [Blessing09, S. 35 ff.]. Eine dafür notwendige wiederholte Planung eines adaptiven Gebäudes mit Anwendung der entwickelten methodischen Unterstützung stellt jedoch eine Rahmenbedingung dar, die eine „Descriptive Study 2“ nicht zulässt. Die Evaluation beschränkt sich daher auf die „Prescriptive Study“ mit der Durchführung sogenannter Unterstützungsevaluationen [vgl. Blessing09, S. 176 ff.]. Das detaillierte Vorgehen zur Evaluation von Ergebnissen dieser Arbeit beschreibt Kapitel 4.4.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Kapitel 9 und einem Ausblick mit potenziell anknüpfendem Forschungsbedarf in Kapitel 10.

Für den Überblick sind in Bild 1.3 auch die weiteren, von der übergeordneten Forschungsfrage abgeleiteten Forschungsfragen (FF) und Bestandteile der Evaluation (EV) den jeweiligen Kapiteln zugeordnet, auf die an der entsprechenden Stelle näher eingegangen wird.

2 Grundlagen der Arbeit

Dieses Kapitel fasst die für das Verständnis der im Rahmen der Arbeit vorgestellten Ergebnisse notwendigen Grundlagen zusammen. Die Beantwortung der ersten Forschungsfrage adressiert die Grundlagen als Stand der Technik bzw. Forschung. Um die Forschungsfrage und deren Beantwortung abzugrenzen, wird die Forschungsfrage mit weiteren untergeordneten Fragestellungen vorgestellt:

Forschungsfrage FF1: *„Auf welches Umfeld und welche bestehenden Planungs- und Entwicklungsprozesse baut ein Planungsprozess für adaptive Gebäude auf?“*

- Auf welche Grundlagen der methodischen Produktentwicklung baut der Planungsprozess auf?
- Auf welche Grundlagen der Gebäudeplanung baut der Planungsprozess auf?
- Auf welche Grundlagen der Prozessentwicklung baut der Planungsprozess auf?
- Auf welchen Forschungsstand im Forschungsfeld adaptiver Gebäude baut der Planungsprozess auf?
- Welche wesentlichen Unterschiede bestehen in Bezug auf branchenspezifische Randbedingungen zwischen dem Bauwesen und dem Maschinenbau?

Da häufig Probleme bei der Begriffsinterpretation zwischen den im Fokus stehenden Branchen bestehen [LINDEMANN05, S. 8], erfolgen zunächst Begriffsdefinitionen für ein einheitliches Verständnis. Darauf aufbauend werden Grundlagen zur methodischen Produktentwicklung sowie der Gebäudeplanung mit Fokus auf die jeweiligen prozessualen bzw. methodischen Vorgehensweisen und Formen der Zusammenarbeit vorgestellt, gefolgt von einem literaturbasierten, interdisziplinären Vergleich von Vorgehensweisen. Für die Prozessentwicklung wird außerdem auf die Grundlagen der in den Ergebnissen der Arbeit enthaltenen Schwerpunkte eingegangen, zu denen die Bewertung von Umweltwirkungen, das Requirements Engineering sowie die Sicherheit technischer Systeme gehören. Damit der zu entwickelnde Prozess bzw. die methodische Unterstützung bestehende Erkenntnisse sowie bekannte Defizite aus der Praxis aufgreift, werden in der Literatur festgehaltene Erfahrungen zum Transfer von Methoden der Produktentwicklung ins Bauwesen als auch allgemeine Herausforderungen in der Hochbauplanung aufgegriffen. Mit einer Gegenüberstellung der Branchen Bauwesen und Maschinenbau schließt das Kapitel ab, bevor im dritten Kapitel ausgewählte Grundlagen zu adaptiven Gebäuden erläutert werden.

2.1 Begriffsdefinitionen

Nachfolgend werden relevante Begriffe dieser Arbeit definiert.

2.1.1 Mechatronische Systeme und Adaptronik

Das Kunstwort „Mechatronik“ (engl. Mechatronics) setzt sich aus der Verschmelzung der englischen Begriffe „mechanism“ und „electronics“ zusammen und steht für die Verbindung der Domänen Mechanik bzw. Maschinenbau und Elektronik bzw. Elektrotechnik. Durch die Fortschritte im Bereich der Mikroelektronik und Mikroprozessortechnik entwickelte sich auch die Informationstechnik zu einem wesentlichen Bestandteil der Mechatronik. [VDI 2206 2004, S. 10]

Mechatronische Systeme bestehen entsprechend Bild 2.1 aus einem Grundsystem sowie funktional bzw. räumlich integrierter Sensoren, Aktoren und einer Informationsverarbeitung. In der Regel handelt es sich beim Grundsystem um eine mechanische, elektromechanische, hydraulische oder pneumatische Struktur oder deren Kombination [VDI 2206 2004, S. 14]. Die Sensoren dienen zur Erfassung von Messgrößen des Systemzustands und die Informationsverarbeitung zur Bestimmung der notwendigen Einwirkungen, die wiederum durch die Aktoren eingebracht werden und zur gewünschten Beeinflussung von Zustandsgrößen des Grundsystems führen. Ein weiterer Bestandteil des Grundsystems ist die Umgebung, für die das System bestimmt ist. Die Potenziale mechatronischer Systeme weisen eine technische sowie wirtschaftliche Dimension auf und zeichnen sich durch die Reduktion von Bauraum, Gewicht und Energieverbrauch, die Funktions- und Verhaltensverbesserung sowie neue Funktionen wie die Anpassungs- und Lernfähigkeit von Systemen aus [FELGEN07, S. 44].

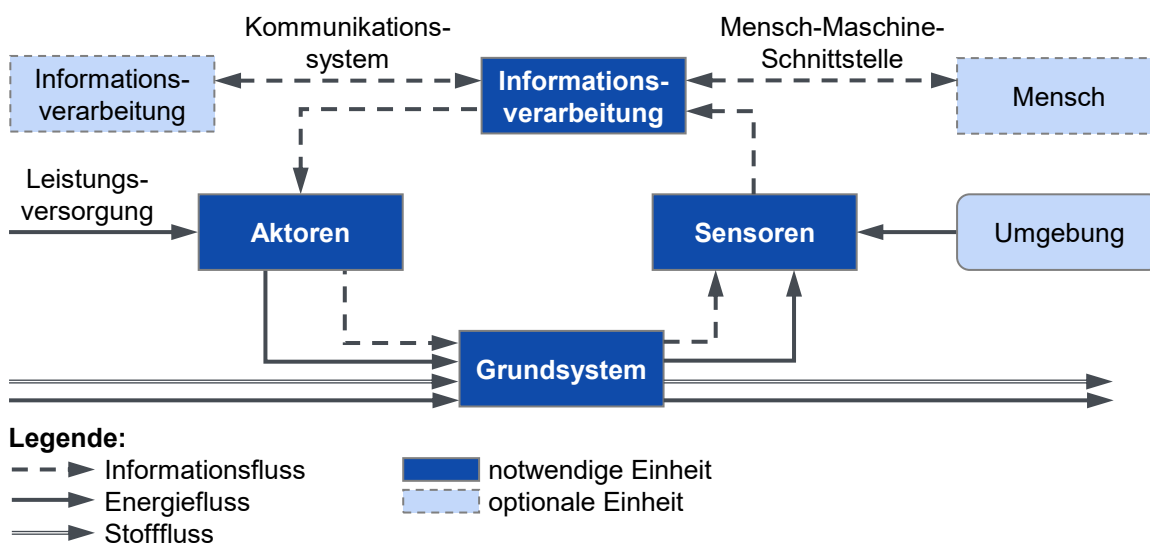


Bild 2.1: Grundstruktur eines mechatronischen Systems [VDI 2206 2004, S. 14]

Ein verwandtes bzw. untergeordnetes Fachgebiet der Mechatronik stellt die Adaptronik dar [VDI 2206 2004, S. 12]. Der Begriff ist ebenfalls ein Kunstwort und setzt sich aus „Adaptiven Strukturen“ und „Elektronik“ zusammen [PAHL07, S. 617; SINAPIUS18, S. 1]. Die Adaptronik zeichnet sich durch Werkstoffstrukturen und die Kombination mit werkstoffintegrierten Sensoren, Aktoren sowie informationsverarbeitenden elektronischen Komponenten aus, welche gleichzeitig tragende, aktorische sowie sensorische Funktionen übernehmen [VDI 2206 2004, S. 12]. Die Struktursysteme können auf Einflüsse aus der Umgebung, wie beispielsweise Windlasten, selbstoptimierend und aktiv reagieren, die vorgegebene Funktion ohne Beeinträchtigung durch die Umwelt erfüllen und durch den Einsatz von Reglern Schwingungen und Verformungen reduzieren bzw. vermeiden [HANSELKA07, S. 1023]. Tabelle 2.1 vergleicht die Mechatronik mit der Adaptronik auf Grundlage von Charakteristiken und Bild 2.2 stellt die Unterschiede von Integrationsstufen sensorischer und aktorischer Eigenschaften dar.

Mechatronik	Adaptronik
Ersatz von mechanischen Komponenten durch elektronische Bauteile unter Beibehaltung der Struktureigenschaften	Aktive Beeinflussung der Struktureigenschaften, z. B. Erzeugen von virtuellen Steifigkeiten, Dämpfungen und Massen
Verwendung von Antrieben und Aktoren mit hohen Energiedichten, konventionelle Technik	Verwendung neuartiger Werkstoffsysteme, aktive oder multifunktionale Materialien, z. B. Piezokeramiken, Formgedächtnislegierungen
Struktur, Elektronik, Aktorik und Sensorik können unabhängig voneinander ausgelegt werden	Alle Komponenten beeinflussen sich gegenseitig, Mehrfeldproblematik, keine unabhängige Entwicklung
Steuerung ist möglich	Regelung ist zwingend erforderlich

Tabelle 2.1: Vergleich von Mechatronik mit Adaptronik [HANSELKA07, S. 1023]

Die Ergebnisse dieser Arbeit bezwecken eine methodische Unterstützung bei der Planung bzw. Entwicklung adaptiver Tragwerkssysteme, unabhängig des Grads der Integration von Aktoren und Sensoren. Im Weiteren wird verallgemeinert der Begriff adaptive Systeme verwendet.

2.1.2 Planen, Entwickeln und Entwerfen

Die Begriffe Planen und Entwerfen sind im Bauwesen zwar in ständigem Gebrauch, die Fachsprache ist jedoch nicht eindeutig [SCHILL-FENDL04, S. 32; MORO09, S. 4]. Zudem weicht das Verständnis der Begriffe in der Produktentwicklung ab. Schill-Fendl [SCHILL-FENDL04] diskutiert diverse Definitionen der Begriffe aus Sicht der Architektur, auf deren Abgrenzung diese Arbeit aufbaut. Zur Veranschaulichung der Definitionen und Zusam-

menhänge ordnet Bild 2.3 die Begriffe in den Lebenszyklus von Gebäuden [vgl. DIN EN 15804 2014, S. 14] und Produkten [vgl. JACKSTIEN14, S. 70; EHRENSPIEL17, S. 199] ein.

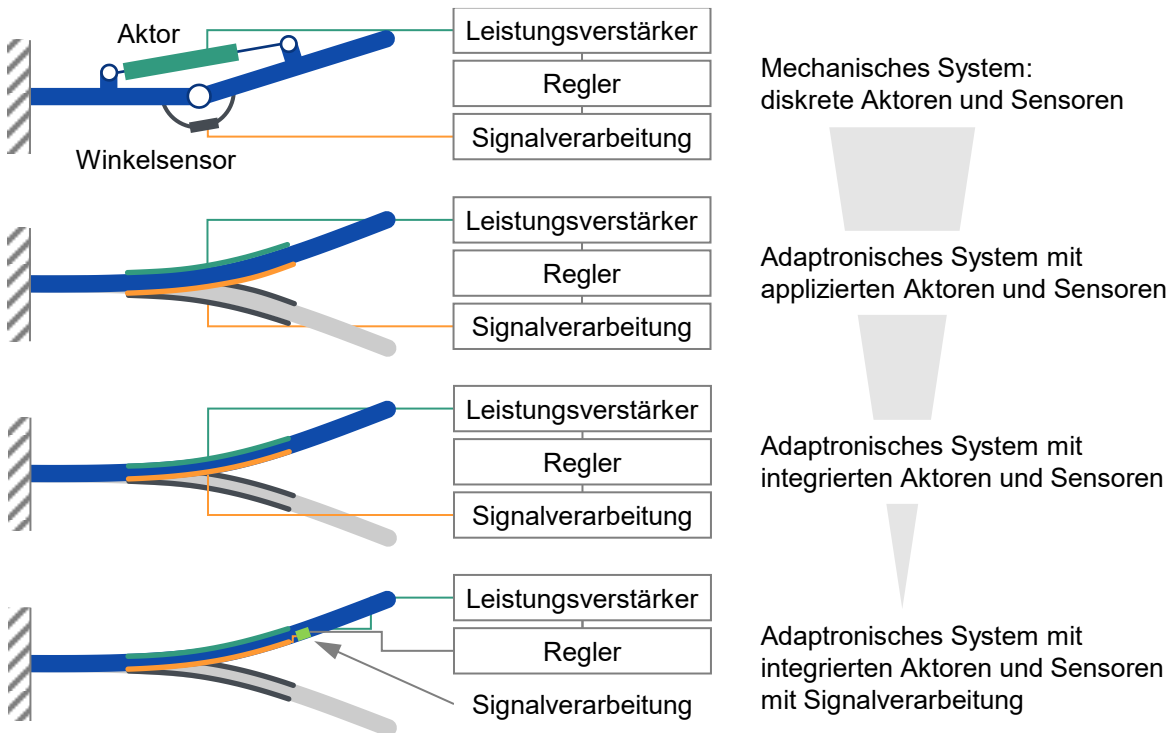


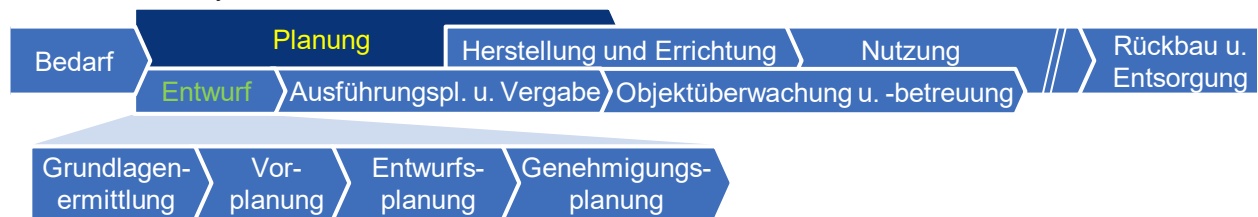
Bild 2.2: Integrationsstufen sensorischer und aktorischer Eigenschaften nach Sinapius [SINAPIUS18, S. 17]

Die Planung im Bauwesen (zur eindeutigen Unterscheidung auch „Bauplanung“) erstreckt sich nach dem Aufkommen eines Bedarfs und mündet in die Phase Herstellung und Errichtung, wobei die Errichtung der Bauausführung auf der Baustelle entspricht [KLEIN08, S. 28]. Meist findet die Ausführungsplanung parallel zur (anfänglichen) Bauausführung statt [Bergmann13, S. 16]. Schill-Fendl [SCHILL-FENDL04, S. 37] definiert die Planung als „systematischen, informationsverarbeitenden Prozess zur zielführenden Lösung einer Aufgabenstellung“. Das Ergebnis der Planung stellt der Plan dar, der als Grundlage für die Bauausführung dient [SCHILL-FENDL04, S. 38]. Zu den Leistungen der Planer zählen gemäß Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI; vgl. Kapitel 2.3) jedoch auch die Objektüberwachung und Dokumentation während der Ausführung sowie die Objektbetreuung nach der Errichtung [HOAI13, Anlage 10].

Das Pendant zur Planung stellt im Maschinenbau die Entwicklung dar, wobei sich die Abgrenzung und die Aktivitäten nicht gleichsetzen lassen. Das Ziel der Entwicklung ist die Definition und Dokumentation aller wesentlichen Eigenschaften eines Produkts, um die Bedürfnisse von Kunden bzw. eines Markts zu befriedigen und einen Gewinn zu erzielen [BENDER16, S. 401]. Die nachfolgende Produktion ist zwar kein Bestandteil der

Entwicklung mehr, typischerweise existiert jedoch ein etablierter Wissensrückfluss für eine stetige Optimierung [vgl. Pahl07, S. 7 ff.].

Gebäudelebenszyklus



Produktlebenszyklus

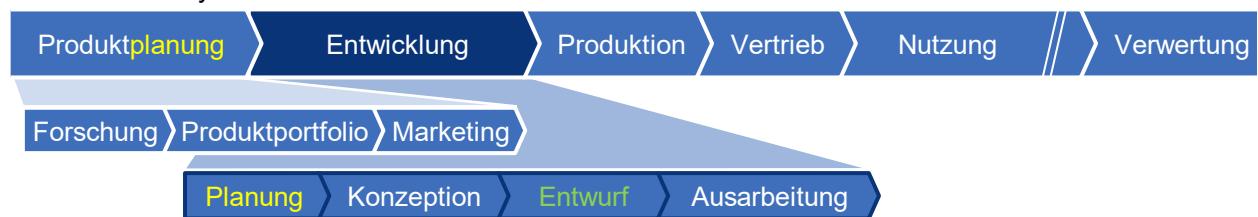


Bild 2.3: Gegenüberstellung der Begriffe Planung, Entwicklung und Entwurf und Einordnung in die Lebenszyklen von Gebäuden und Produkten

In der Literatur wird innerhalb des Produktentstehungsprozesses, der von der Produktidee bis zum fertigen Produkt alle erforderlichen Schritte und folglich auch die Produktentwicklung umfasst [FELDHUSEN13A, S. 23], die Planungsphase unterschiedlich abgegrenzt. Entweder erfolgt die *Produktplanung* zu Beginn des Produktlebenszyklus, bestehend aus den Phasen Forschung, Erstellen des Produktportfolios und Marketing [JACKSTIEN14, S. 71, vgl. WIGEP18] und sieht auf mittel- und langfristige Sicht die Ermittlung strategischer Vorgaben an neue Produkte vor, die in Produktideen zu überführen und auf Märkten zu positionieren sind [SCHUH12, S. 59]. Oder die Planung entspricht gemäß dem Entwicklungsprozess nach Pahl und Beitz [PAHL07, S. 17] mit den Phasen *Planen*, Konzipieren, Entwerfen sowie Ausarbeiten, der inhaltlichen, zeitlichen bzw. terminlichen sowie monetären Planung der Entwicklungsarbeit. Die Phase „Planen“ wird in dem Fall auch synonym „(Planen und) Klären der Aufgabenstellung“ bezeichnet [VDI 2221-1 2019, S. 16; PAHL07, S. 198]. Pahl und Beitz weisen darauf hin, dass unabhängig davon, ob eine Produktplanung im Voraus erfolgte, die Entwicklungsaufgabe zu Beginn näher zu klären ist [PAHL07, S. 195]. Entsprechend überschneiden sich beide Abgrenzungen bzw. ist von einem fließenden Übergang der jeweiligen Aktivitäten auszugehen. Das Entwerfen als dritte Phase des Produktentwicklungsprozesses nach Pahl und Beitz [PAHL07, S. 17] sieht die Überführung eines Konzepts in ein quantitativ funktionsfähiges, kostengünstig fertigbares, recyclefähiges körperlich gestaltetes Gebilde unter Berücksichtigung aller wesentlichen Bauteile und Baugruppen vor [EHRENSPIEL17, S. 324]. Das

Vorgehen ist dabei iterativ und besteht aus abwechselnden Synthese- (Vorstellung und Zeichnung) und Analyseschritten (Berechnung, Versuch und Bewertung) [EHRENSPIEL17, S. 324]. In der Architektur steht das Entwerfen für einen schöpferischen, kreativen Prozess, in dem innerhalb und parallel zur Planung systematisch oder intuitiv eine im Vorhinein nicht berechenbare Vorlage für ein einmaliges architektonisches Objekt zu einem zu bestimmenden Nutzen und der späteren Herstellung erarbeitet wird [SCHILL-FENDL04, S. 45].

Im Vergleich beider Disziplinen ist im Maschinenbau das Konzept, das bereits den prinzipiellen Aufbau und Zusammenhang der Lösung sowie grundsätzliche gestalterische Aspekte festlegt [FELDHUSEN13C, S. 341], die Grundlage für das Entwerfen, während in der Architektur das Entwerfen der Überbegriff der Phasen von der Grundlagenermittlung bis zur Genehmigungsplanung darstellt [LORENZ10, S. 11 und S. 13].

Das Pendant zum Erstellen abstrakter Lösungen während der Konzeptphase der Produktentwicklung stellt in der Architektur die Vorplanung dar, in der (Planungs- bzw.) Entwurfskonzepte erstellt und als Varianten untersucht werden. Während es sich in diesem Stadium der Produktentwicklung um abstrakte Lösungen handelt und die Gestalt noch nicht im Vordergrund steht [EHRENSPIEL17, S. 322], basiert die Vorplanung auf Bauzeichnungen (kleineren Maßstabs) mit Ansichten, Grundrissen und Schnitten des Planungsobjekts [LORENZ10, S. 17]. Die Vorplanung [HOAI13, § 34] wird daher auch Vorentwurf [LORENZ10, S. 16] genannt. Da beide Bezeichnungen etabliert sind, ist auch in diesem Kontext die uneinheitliche Verwendung der Begriffe Planung und Entwurf erkennbar [SCHILL-FENDL04, S. 32]. Im Weiteren wird der Begriff „Vorentwurf“ genutzt.

2.1.3 Bestandteile systematischen Vorgehens

Ein systematisches Vorgehen wird durch Vorgehensmodelle, Prozesse, Methoden bzw. Methodiken, Methodenbaukästen und Werkzeuge unterstützt. Die Begrifflichkeiten stellen wesentliche Bestandteile dieser Arbeit dar und sind abzugrenzen.

Vorgehensmodelle beschreiben für bestimmte Situationen oder Zielsetzungen wichtige Elemente einer Handlungsabfolge und formulieren entweder wiederkehrende Muster im Vorgehen (deskriptiv) oder sind als Empfehlung von durchzuführenden Arbeitsschritten und deren Abfolge im Sinne einer Handlungsvorschrift (präskriptiv) zu verstehen [PONN11, S. 458; LINDEMANN09, S. 337]. Die Strukturierung größerer Arbeitsaufgaben in Abschnitte kann beispielsweise anhand von Aktivitäten oder anzustrebenden Meilensteinen erfolgen [VAJNA14A, S. 30].

Ein **Prozess** stellt eine geschlossene, logische und zeitliche Sequenz von Arbeitsschritten dar [KRAUSE18, S. 278], um unter Berücksichtigung gegebener Randbedingungen ausgehend von Eingangsinformationen (Input) ein definiertes Ziel (Output) zu erreichen [LINDEMANN09, S. 334]. Die Arbeitsschritte werden mit Hilfe von Ressourcen wie erforderliche Fachdisziplinen, Methoden und Werkzeuge ausgeführt und sind mit dem Informationsfluss verknüpft [LINDEMANN09, S. 334]. Aus dem Prozess geht hervor, welche Aktivitäten seriell oder parallel zueinander ausgeführt werden können [VAJNA14B, S. 587].

Eine **Methode** ist ein „planmäßiges und regelbasiertes Vorgehen, nach dessen Vorgabe bestimmte Aktivitäten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen“ [PAHL07, S. 784; PONN11, S. 443; LINDEMANN09, S. 333]. Methoden bieten eine Unterstützung, um komplexe Problemstellungen durch deren Zerlegung in überschaubare Teilprobleme zu durchdringen und Denkbarrieren zu überwinden, Zielkonflikte sowie Handlungsschwerpunkte zu identifizieren sowie Kreativität zu fördern [KRAUSE18, S. 273]. Das Entstehen und Ablaufen von Methoden kann wie deren Anwendung bewusst oder unbewusst erfolgen [EHRENSPIEL17, S. 911]. Während Vorgehensmodelle und Prozesse definieren, „was“ zu tun ist, d. h. „welche Schritte durchzuführen sind“, beschreiben Methoden, „wie“ die Umsetzung der Tätigkeiten erfolgt, d. h. „auf welche Art und Weise und mit welchem Ergebnis die Schritte durchzuführen sind“ [LINDEMANN09, S. 58; vgl. EIGNER14B, S. 47].

Häufig sehen Methoden die Anwendung weiterer Methoden vor [KRAUSE18, S. 273]. Die Zusammenfassung bzw. Kombination von verschiedenen Methoden, Werkzeugen und die Berücksichtigung von Strategien zum Erreichen eines bestimmten Ziels wird als **Methodik** bezeichnet [EHRENSPIEL17, S. 911; LINDEMANN09, S. 58].

Die im Kontext der Produktentwicklung und des Innovationsmanagements zahlreich vorhandenen Methoden [ALBERS15, S. 2] lassen sich für bestimmte Arbeitsabschnitte eines Prozesses alternativ einsetzen und systematisch geordnet sammeln [EHRENSPIEL17, S. 434, 911]. Eine umfangreiche, systematische Sammlung von Methoden, die sich in der Anwendung zum Erreichen beliebiger Ziele vielseitig kombinieren lassen und für deren Auswahl eine Hilfestellung gegeben ist, stellt einen **Methodenbaukasten** dar [KRAUSE18, S. 159; EHRENSPIEL17 S. 434].

Die Durchführung von Methoden bzw. einzelnen Arbeitsabschnitten wird durch **Werkzeuge** unterstützt, um die Effizienz und Effektivität zu steigern [LINDEMANN09, S. 62 und 337]. Diese Hilfsmittel können von einfachen Checklisten und Formblättern bis zu komplexen Softwarewerkzeugen reichen [PONN11, S. 458 f.] und beeinflussen den Erfolg einer Methode wesentlich [KRAUSE18, S. 273].

2.1.4 Abgrenzung von Multi-, Inter- und Transdisziplinarität

Die Form der Zusammenarbeit beim Lösen von Aufgaben von mehreren beteiligten Disziplinen kann unterschiedlich ausgeprägt sein. Bild 2.4 stellt diese für die multi-, inter- und transdisziplinäre Form gegenüber. Bei der Multidisziplinarität arbeiten verschiedene Disziplinen (D) mit weitläufig gemeinsamem Hintergrund nebeneinander an jeweiligen Aufgaben (A), ohne dass zwangsläufig eine Zusammenarbeit stattfindet [BENEKE04, S. 86 f.]. Bei der Interdisziplinarität wird eine Aufgabe anteilig von mehreren Disziplinen bearbeitet, wobei die Bearbeitung überwiegend innerhalb der bestehenden Grenzen in den Fachrichtungen erfolgt und ein Austausch nicht zwingend erforderlich ist [BENEKE04, S. 86]. Im Gegensatz zur Multi- und Interdisziplinarität treten im Fall der Transdisziplinarität die beteiligten Disziplinen miteinander in Beziehung [BRAND04, S. 52 f.]. Dabei überschreiten die Disziplinen inhaltlich und auf methodischer Ebene ihre gewohnten Grenzen [BRAND04, S. 54]. Bei der Transdisziplinarität wird die in einem Fachbereich entstandene Aufgabe mit zumindest einer zweiten Disziplin und deren jeweiligen spezifischen Methoden und Denkweisen bearbeitet, wobei ein tendenziell umfassender Austausch stattfindet und zum Bearbeitungsprozess gehört [BENEKE04, S. 86].

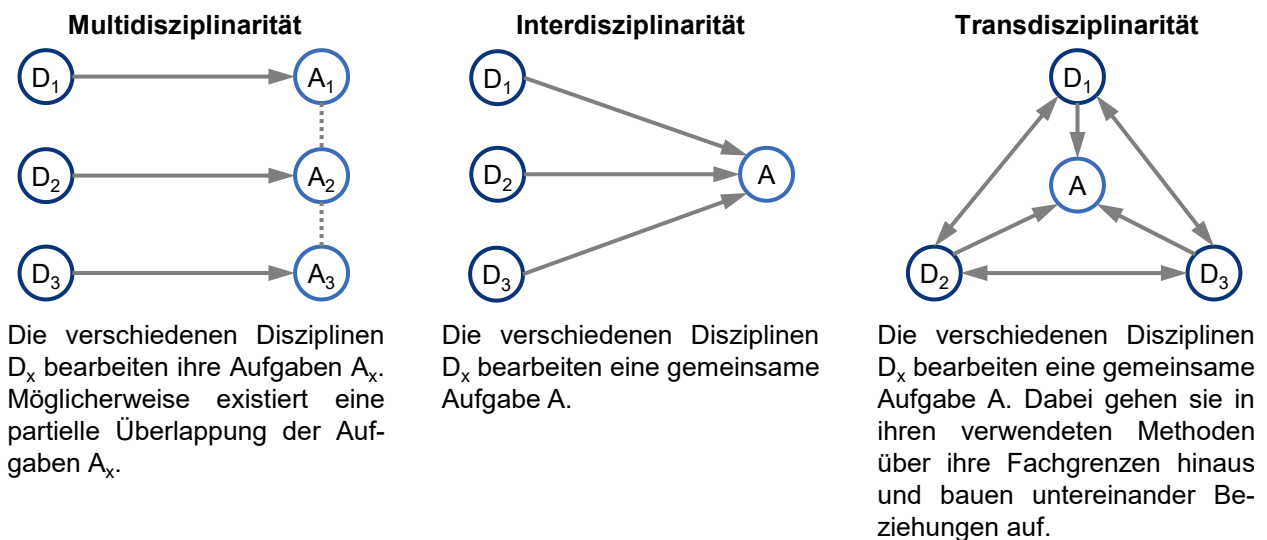


Bild 2.4: Unterschiede zwischen Multi-, Inter- und Transdisziplinarität nach Zirkler [ZIRKLER10, S. 8] bzw. Brand [BRAND04, S. 52 f.]

Wenn bei der transdisziplinären Zusammenarbeit die Grenzen durch deren Überschreitung so stark verschwimmen, dass keine Trennung mehr ersichtlich ist, stellt dies den Ursprung einer neuen Disziplin dar [BRAND04, S. 54 f.]. Beneke [BENEKE04, S. 88] merkt an, dass sich in der Praxis eine exakte Abgrenzung und Zuordnung der Form der Zusammenarbeit zu den Definitionen nicht immer vornehmen lässt. Außerdem sind die Formen für jeweilige Aufgaben unterschiedlich geeignet und die begriffliche Abgrenzung trifft

keine Aussage zur Qualität der Zusammenarbeit. Im Weiteren wird daher verallgemeinert der Begriff „Interdisziplinarität“ verwendet, da diese Zusammenarbeitsform die Mindestanforderung vieler Aktivitäten im Kontext adaptiver Gebäude darstellt.

2.1.5 Systems Engineering und Model-Based Systems Engineering

Das International Council on Systems Engineering (INCOSE) definiert Systems Engineering als Disziplin eines transdisziplinären und integrativen Ansatzes, um die erfolgreiche Realisierung, Nutzung und Stilllegung von komplexen und vernetzten technischen Systemen unter Verwendung vielseitiger (...) Methoden zu ermöglichen [INCOSE21]. Nach Eigner et al. [EIGNER14A, S. 4] basiert System Engineering auf dem Prinzip, dass „ein System mehr ist als die Summe seiner Teilsysteme“ und daher „nicht nur die Zusammenhänge der Teilsysteme, sondern vor allem auch die Gesamtzusammenhänge betrachtet werden“ sollen. Die Disziplin „System Engineering“ bildet das ‚Herz‘ der erfolgreichen Entwicklung neuer Systeme und ist für deren erfolgreiche Umsetzung durch die Erfüllung zugrunde gelegter Anforderungen, der Handhabung der Komplexität und Risiken sowie der Ausführung des disziplinenübergreifenden Entwicklungsprozesses verantwortlich [INCOSE21, SCHULZE16, S. 153 ff.].

Die Weiterführung des Systems Engineerings stellt das Model-Based Systems Engineering dar, indem der Ansatz in jeder Phase des Entwicklungsprozesses bzw. bis in späte Lebenszyklusphasen spezifische, digitale Systemmodelle integriert [EIGNER14B, S. 45]. Durch die Modellierung werden Systemanforderungen, das Design bzw. die Konstruktion sowie Analyse-, Verifikations- und Validierungsaktivitäten formalisiert und dabei jeweilige Entwicklungsschritte unterstützt [SCHULZE16, S. 159 f., INCOSE21].

Die Planung adaptiver Gebäude erfüllt die erläuterten Kriterien zur Anwendung des (Model-Based) Systems Engineerings. Der zu entwickelnde Planungsprozess wird als Bestandteil eines zukünftigen Systems Engineerings für adaptive Gebäude verstanden.

2.2 Grundlagen der methodischen Produktentwicklung

Die nachfolgenden Abschnitte vermitteln einen grundlegenden Überblick über methodische Vorgehensweisen in der Produktentwicklung. Dabei werden zunächst die Ziele der Konstruktions- bzw. Entwicklungsmethodik vorgestellt, die Hauptschritte der Problemlösung und darauf aufbauende, ausgewählte Vorgehensmodelle der Produktentwicklung beschrieben, Einblicke in den Methodeneinsatz gegeben sowie die integrierte Produktentwicklung erläutert.

2.2.1 Ziele von methodischen Vorgehensweisen

Entwicklungsaufgaben weisen eine hohe Vielfalt auf und reichen beispielsweise von der Anpassungskonstruktion eines einfachen Hebels bis zur Entwicklung einer Produktplattform mehrerer PKWs oder von Produktionsanlagen. Der Begriff Produktentwicklung beschreibt dabei die Phase, „in der alle relevanten Eigenschaften und Daten eines Produkts für alle anderen Bereiche des Unternehmens und die spätere Nutzung und Verwertung festgelegt werden“ [VAJNA14B, S. 586]. Entsprechend sind diese Aufgaben von einer Person oder mehreren tausend Spezialisten unterschiedlicher Fachbereiche zu bearbeiten. Um insbesondere komplexe Entwicklungsaufgaben lösen und die Beteiligten koordinieren zu können, sieht die methodische Produktentwicklung die Unterteilung der erforderlichen Abläufe in einzelne, logisch abgrenzbare Abschnitte vor, die für die Bearbeitung und Bewältigung nochmals in handhabbare Arbeitspakete gegliedert werden [LINDEMANN09, S. 33].

Entwicklungsmethodiken haben das übergeordnete Ziel, das Entwickeln von Produkten sowie die untergeordneten Aktivitäten wie das Konzipieren und Entwerfen zu unterstützen [Bender16, S. 408]. Mit der Anwendung sollen insbesondere die Kreativität gesteigert, Fehler vermieden sowie eine Hilfestellung bei der Planung der Aktivitäten sowie der Kommunikation der an der Entwicklung beteiligten Personen und Disziplinen geboten werden [vgl. PAHL07, S. 11]. Modelle zur Problemlösung helfen beispielsweise, um Barrieren beim Lösen von Problemen zu überwinden [VDI 2221-1 2019, S. 8; Lindemann09, S. 29], indem das Problem in ein abstrahiertes Problemmodell überführt wird, auf dieser Ebene Lösungsideen ermittelt werden und die Lösungsidee daraufhin wieder in den eigentlichen Bereich übertragen wird [PONN11, S. 92].

Einen Überblick über Ziele der Konstruktions- bzw. Entwicklungsmethodik nach Ehrlenspiel [EHRLENSPIEL17, S. 13] stellt Bild 2.5 dar. Daraus geht hervor, dass neben den bisher erläuterten technischen und organisatorischen Zielen auch persönliche und didaktische Ziele durch die Methodik adressiert werden.

Studien belegen, dass das methodische Vorgehen insbesondere in den frühen Phasen bei der Definition von Anforderungen und während der Konzeption zu einem zeitlichen Mehraufwand führen kann, der aber tendenziell die Häufigkeit von Änderungen in späten Phasen reduziert und im Allgemeinen eine bessere Dokumentation der Entwicklungsaktivitäten gewährleistet [GÜNTHER99, S. 447 f.]. Daneben zeigen laut Lindemann [LINDEMANN09, S. 46] Forschungsergebnisse und Beobachtungen in der industriellen Praxis,

dass sowohl die intensive Befassung mit dem Problem wie auch die präventive Absicherung von nachfolgenden Handlungen von erheblicher Bedeutung sind.

Technische Ziele	Hilfestellung bei der <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von neuartigen Produkten • Entwicklung von besseren Produkten mit optimalem Kundennutzen/Kundenkosten
Organisatorische Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Rationalisierung der Konstruktionsarbeit • Verkürzung der Konstruktionszeit und der Produktlieferzeit • Erleichtern von Teamarbeit • Erleichterung des interdisziplinären Arbeitens • Nachvollziehbar machen von Konstruktionen • Objektivierung der Konstruktionsarbeit • Verbesserung rechnergestützten Konstruierens • Verkürzung der Einarbeitungszeit für Konstrukteure
Persönliche Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Hilfestellung in neuartigen Situationen • Steigerung der Kreativität • Nachvollziehbar machen von Konstruktionen • Erweiterung des Problembewusstseins • Verbesserung der Präsentation der Konstruktion gegenüber Vorgesetzten, Kunden, ... • Erleichtern des Überblicks über das ständig wachsende Fachgebiet • Einarbeiten in ein neues Produktspektrum
Didaktische Ziele	<ul style="list-style-type: none"> • Lehrbar machen des Konstruierens • Rationalisierung der Lehre

Bild 2.5: Ziele der Konstruktions- bzw. Entwicklungsmethodik [EHRENSPIEL17, S. 13]

2.2.2 Vorgehensmodelle der Produktentwicklung

Vorgehensmodelle sind in der Produktentwicklung ein wichtiges Hilfsmittel, mit dem der Anwender die Situation, in der er hinsichtlich des aktuellen Fortschritts innerhalb eines komplexen Entwicklungsprozesses befindet [PONN11, S. 17], einschließlich zugehöriger Handlungsempfehlungen wiederfindet und um die involvierten Personen, Disziplinen, deren Aktivitäten, Informationsflüsse sowie benötigten Ressourcen zu koordinieren [BENDER16, S. 404]. Die Grundlage dazu sind typischerweise in der Praxis und empirischen Forschung analysierte Prozesse, die situationsbedingt zum Erfolg führten und wiederkehrende Muster aufzeigen [LINDEMANN09, S. 36]. Die gewonnenen Erkenntnisse werden als Handlungsanweisungen formuliert und weisen aufgrund einer vorgenommenen Verallgemeinerung bzw. Abstraktion auch Gültigkeit für weitere Aufgabenstellungen auf [LINDEMANN09, S. 36].

Vorgehensmodelle, unter anderem auch weiterer Disziplinen, und deren jeweiligen Phasen werden in der Literatur ausführlich diskutiert bzw. (tabellarisch) gegenübergestellt [HOWARD08; EISENBART11; GERICKE12; EIGNER14B]. Nach Eigner [EIGNER14B, S. 16] basieren nahezu alle für die Entwicklung mechanischer Produkte etablierten Vorgehensmo-

delle auf den vier Hauptphasen „Klärung der Aufgabenstellung und Anforderungen bzw. Planen“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ sowie „Ausarbeiten bzw. Detaillieren“ und unterliegen somit dem Grundprinzip „vom Abstrakten zum Konkreten“ [PAHL07, S. 19 ff.]. Trotz der ähnlichen Phasen und ähnlichen Inhalte variieren die Darstellungsarten der Vorgehensmodelle hinsichtlich des Detaillierungs- und Formalisierungsgrads stark [VDI 2221-1 2019, S. 16]. Im Folgenden werden drei Vorgehensmodelle vorgestellt, die die typische Vorgehensweise in der Produktentwicklung repräsentieren und als Grundlage für Ergebnisse dieser Arbeit einfließen.

2.2.2.1 VDI 2221 bzw. Entwicklungs- und Konstruktionsprozess nach Pahl/Beitz

Die VDI Richtlinie 2221 [VDI 2221 1993] bzw. deren Neufassung [VDI 2221-1 2019 bzw. VDI 2221-2 2019] ist von mehreren Konstruktionswissenschaftlern erarbeitet worden und gilt im deutschen Sprachraum seit der Erstfassung im Jahr 1986 als gemeinsame Basis oder „Konsens“ [CROSS92, S. 325] für den Entwicklungsprozess mechanischer Produkte [PAHL07, S. 21; EIGNER14B, S. 16]. Die Richtlinie beschreibt das generelle Vorgehen beim Entwickeln, ausgehend von der Aufgabenstellung bzw. dem zu lösenden Problem bis zum Abschluss der Konstruktion, und unterteilt diesen Prozess in acht Schritte mit zunehmendem Konkretisierungsgrad. Für jeden Schritt sind resultierende Dokumente in Form von Arbeitsergebnissen angegeben [LINDEMANN09, S. 44]. Bild 2.6 stellt die Schritte und die jeweiligen Ergebnisse dar, die sich den übergeordneten Phasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten zuordnen lassen. Die vier Phasen entstammen dem Entwicklungs- und Konstruktionsprozess nach Pahl/Beitz, der in der Richtlinie VDI 2221 aufgegriffen wird [FELDHUSEN13A, S. 16]. In der Neufassung wurde der bei Vorgehensmodellen häufig vermittelte sequenzielle (und daher kritisierte) Charakter in der Darstellungsform der Abläufe [LINDEMANN09, S. 44] überarbeitet. Weiterhin wird die enge Verzahnung der Arbeitsschritte und die Notwendigkeit eines iterativen Vorgehens betont [VDI 2221-1 2019, S. 10].

Angestoßen wird das in Bild 2.6 beschriebene Vorgehen durch eine unternehmensinterne oder -externe Produktplanung, die in Form eines Entwicklungsauftrags die Aufgaben- bzw. Problemstellung darstellt [VDI 2221-1 2019, S. 17]. Je nach Aufgabenstellung umfasst ein Entwicklungsprozess das Durchlaufen aller, nur geeigneter oder die Wiederholung einzelner Schritte [VDI 2221-1 2019, S. 17]. Zudem lassen sich die Schritte je nach Komplexität nochmals in untergeordnete Aktivitäten untergliedern [VDI 2221-1 2019, S. 17]. Typischerweise wird das Gesamtverfahren bei Produkten der Einzelfertigung im

Sondermaschinen- und Anlagenbau einmalig, der Kleinserie wiederholt und der Großserie mehrmals durchlaufen [VDI 2221 1993, S. 8].

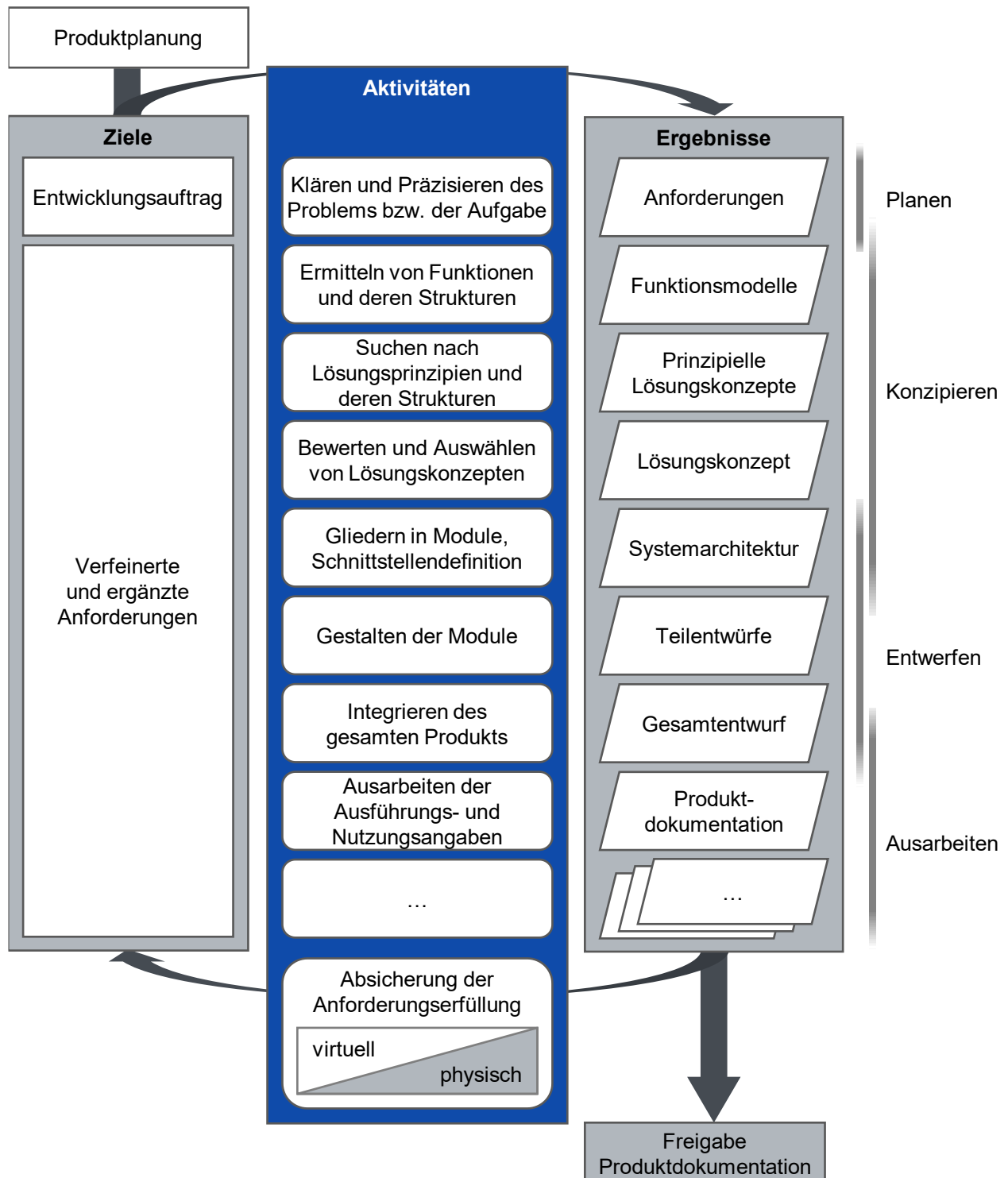


Bild 2.6: Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach VDI 2221 [VDI 2221-1 2019, S. 16]

Ein Durchlauf beginnt zuerst mit der Planungsphase, in der die Aufgabenstellung geklärt, präzisiert sowie das weitere Vorgehen strukturiert wird. Ein wesentliches Ergebnis stellt

nach dem Zusammentragen aller notwendigen bzw. verfügbaren Informationen das Definieren von Anforderungen an das Produkt dar [VDI 2221-1 2019, S. 18].

In der nachfolgenden Konzeptphase werden zunächst möglichst lösungsneutrale Funktionen des Produkts (z. B. „Drehbewegung erzeugen“) und deren Strukturen ermittelt. Diese Funktionsmodelle bilden eine sinnvolle Verknüpfung der für die Lösung erforderlichen Funktionen und stellen die Grundlage für die Produktarchitektur dar [FELDHUSEN13B, S. 251]. Der Festlegung der Funktionen schließt sich die Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen an. Für jede Teilfunktion sind idealerweise mehrere geeignete physikalische, chemische, elektrische oder sonstige Effekte wie Algorithmen der Informationstechnik zu ermitteln (z. B. Motor oder Handkurbel) und wirkstrukturelle Festlegungen wie beispielsweise Geometrie, Bewegung und Werkstoffart zu treffen [VDI 2221-1 2019, S. 19]. Die dabei gewonnenen Wirkprinzipien können typischerweise vielfältig kombiniert werden. Eine Kombination, die das Zusammenwirken ausgewählter Wirkprinzipien beschreibt, ergibt die Wirkstruktur einer Lösung, welche dem Lösungsprinzip zur Erfüllung der Gesamtaufgabe entspricht [FELDHUSEN13B, S. 249]. Als Skizzen, einfache Modelle oder verbale Beschreibungen dokumentierte Lösungsprinzipien stellen als Ergebnis prinzipielle Lösungskonzepte dar [VDI 2221-1 2019, S. 20]. Die Lösungskonzepte sind anschließend hinsichtlich der Erfüllung der gestellten Anforderungen zu bewerten, um die vielversprechendste Variante auszuwählen und nachfolgend weiter zu detaillieren.

Im nächsten Schritt ist das Gliedern der ausgewählten Lösung in realisierbare Module und die Definition der resultierenden Schnittstellen vorgesehen, wodurch die sogenannte Systemarchitektur gebildet wird [VDI 2221-1 2019, S. 20]. Die Modularisierung unterstützt die Aufteilung der Entwicklungsarbeit für ein effizientes Vorgehen während den nachfolgenden arbeitsintensiven Gestaltungsschritten. Beispielsweise können Module von bestimmten Fachbereichen mit dem jeweiligen Fachwissen disziplinspezifisch oder bei komplexen Systemen gezielt interdisziplinär weiter detailliert werden [VDI 2221-1 2019, S. 20]. In diesem Stadium geht die Konzeptphase in die Entwurfsphase über.

Beim Gestalten der Module werden jeweils die geometrischen, stofflichen und informationstechnischen Festlegungen konkretisiert. Das Ziel dieses Schritts ist es, die Lösung so lange zu detaillieren, bis das Gestaltoptimum erkennbar wird [VDI 2221-1 2019, S. 21]. Das Ergebnis stellt einen Teilentwurf für jedes Modul in Form von Modellen (CAD-Modelle, Prototypen, Musterteile etc.), Zeichnungen bzw. Plänen dar.

Der nächste Schritt im Vorgehensmodell der VDI 2221 wird als Integrieren des gesamten Produkts bezeichnet. Durch die Feingestaltung, weitere Angaben oder sonstige Ergän-

zungen werden die vorentworfenen Module einschließlich aller Baugruppen und Teile miteinander verknüpft, endgültig festgelegt und in einem Gesamtentwurf des Produkts zusammengeführt [VDI 2221-1 2019, S. 21]. Das Ergebnis enthält alle wesentlichen gestalterischen Festlegungen, z. B. in Modellen, Zeichnungen, Stücklisten und Prozessdarstellungen.

Die Ausarbeitungsphase, die im Wesentlichen den Schritt des Erarbeitens der Ausführungs- und Nutzungsangaben enthält, sieht die Produktdokumentation mit den erforderlichen Angaben zur Herstellung, Nutzung und Produktzertifizierung vor [VDI 2221-1 2019, S. 21]. Da bereits wesentliche Festlegungen zur fertigungstechnischen Umsetzung und dem Produktgebrauch getroffen wurden, überlappt dieser Schritt mit dem bzw. den vorangegangenen [VDI 2221-1 2019, S. 21].

Während der Produktentwicklung und als deren abschließender Schritt findet im Rahmen der Absicherung der Anforderungserfüllung ein virtueller oder physischer Abgleich zwischen Ergebnis und Zielen bzw. Anforderungen statt. Zu dieser Analyse zählen alle Aktivitäten der Berechnung, Simulation, Versuche, Erprobungen bzw. sonstiger Tests. [VDI 2221-1 2019, S. 21]

Nach Pahl et al. [PAHL07, S. 775] stellen bei der Entwicklung eines technischen Systems die Phasen Konzipieren und Entwerfen die Schwerpunkte dar.

2.2.2.2 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

Die „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ stellt den Inhalt der VDI-Richtlinie 2206 dar und bildet eine Grundlage für die Kommunikation und Kooperation bei der domänenübergreifenden Entwicklung mechatronischer Systeme [VDI 2206 2004, S. 8]. Die Methodik fördert die interdisziplinäre Zusammenarbeit, die sich als „herausragender Erfolgsfaktor bei der Entwicklung mechatronischer Systeme erwiesen hat“ [VDI 2206 2004, S. 3]. Die Richtlinie wurde während der Fertigstellung dieser Arbeit in einer überarbeiteten Fassung veröffentlicht und zur VDI-Richtlinie „Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme“ [VDI 2206 2021] umbenannt. Da während der Planung des Experimentalhochhauses die Vorgängerversion Gültigkeit hatte, wird diese als Grundlage beibehalten und weiter vorgestellt.

Die Methodik stützt sich im Wesentlichen auf die drei Elemente „allgemeiner Problemlösungszyklus auf der Mikroebene“, „V-Modell auf der Makroebene“ sowie „vordefinierte Prozessbausteine zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme“ [VDI 2206 2004, S. 26].

Das grundsätzliche und im Rahmen dieser Arbeit fokussierte Vorgehen der Methodik basiert auf dem in Bild 2.7 dargestellten V-Modell, welches aus der Softwareentwicklung übernommen [BRÖHL95] und an die Mechatronik angepasst wurde [VDI 2206 2004, S. 26]. Das V-Modell, dessen Bezeichnung durch die Visualisierung von dessen Phasen in Form eines V's resultiert, ist als generisches Modell zu verstehen und fallweise auszuprägen [VDI 2206 2004, S. 29]. Analog zur Richtlinie VDI 2221 bildet ein konkreter Entwicklungsauftrag den Ausgangspunkt [PONN11, S. 18].

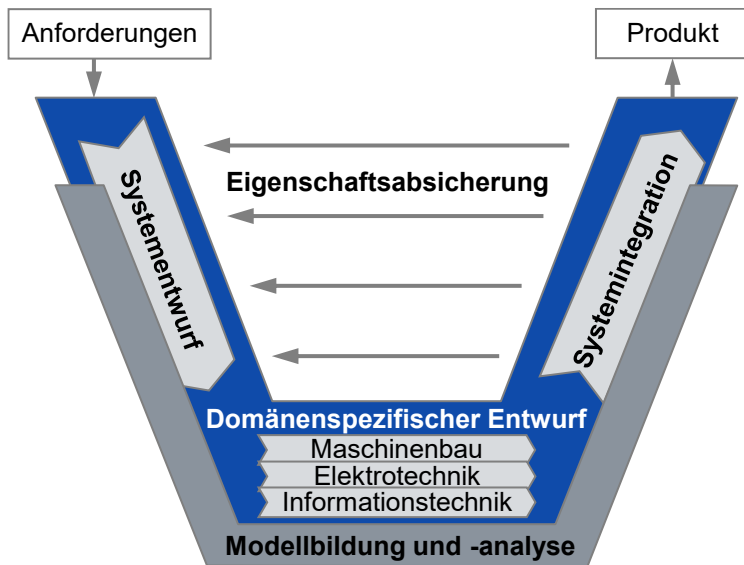


Bild 2.7: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme [VDI 2206 2004, S. 29]

Der Fokus der Darstellung liegt auf der Eigenschaftensicherung [BENDER16, S. 403]. Die linke Seite des V's repräsentiert die Produktdefinition, während die rechte Seite Tests zum Nachweis der realisierten Funktionen und Produkteigenschaften gegenüberstellt [BAUMGART16, S. 428]. Die Basis dafür sind die im ersten Schritt beschriebenen Anforderungen zur Präzisierung der Aufgabenstellung. Zugleich bilden diese Anforderungen den Maßstab, auf dessen Grundlage sich das fertige Produkt bewerten lässt [VDI 2206 2004, S. 29]. Im nachfolgenden Systementwurf erfolgt die Festlegung des domänenübergreifenden Lösungskonzepts, das wesentliche physikalische und logische Wirkungsweisen des zu entwickelnden Produkts beschreibt [PONN11, S. 18]. Konstruktionsmethodisch entspricht das Ergebnis einem „Konzept“, welches jedoch in dieser Methodik als Entwurf bezeichnet wird [EHRLENSPIEL17, S. 345]. Auf Grundlage des interdisziplinär erarbeiteten Lösungskonzepts wird die Lösung typischerweise spezifisch in den Disziplinen (Maschinenbau, Elektrotechnik, Informationstechnik) weiter konkretisiert [VDI 2206 2004, S. 30]. Die in den Domänen entwickelten Ergebnisse werden nachfolgend bei der sogenannten Systemintegration zu einem Gesamtsystem integriert und das Zusammenwirken unter-

sucht [PONN11, S. 18]. Fortlaufend wird unter der Bezeichnung Eigenschaftsabsicherung der Entwurfsfortschritt anhand der Anforderungen und des spezifizierten Lösungskonzepts überprüft und dabei sichergestellt, dass tatsächliche und gewünschte Systemeigenschaften übereinstimmen [VDI 2206 2004, S. 30]. Parallel zu den beschriebenen Phasen werden im Rahmen der Modellbildung und -analyse mit Hilfe von Modellen und rechnerunterstützten Werkzeugen zur Simulation die Systemeigenschaften abgebildet und untersucht [VDI 2206 2004, S. 30]. Das Ergebnis des Durchlaufens aller Phasen stellt das Produkt dar, welches im Fall eines komplexen mechatronischen Systems üblicherweise nicht innerhalb eines Zyklus entsteht [PONN11, S. 18]. In der Regel sind mehrere Durchläufe erforderlich, deren jeweilige Ergebnisse im Sinne von Reifegraden einer zunehmenden Konkretisierung (wie z. B. Labormuster, Funktionsmuster, Vorserienprodukt) des zu entwickelnden Produkts entsprechen [VDI 2206 2004, S. 30]. Für eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Prozessphasen und jeweils untergeordnete Ergebnisse wird auf Isermann [ISERMANN05, S. 25 ff.] verwiesen. Neben dem V-Modell existieren davon abgeleitete Vorgehensmodelle für „eingebettete Systeme“ [BENDER05, S. 45] sowie für die „modellbasierte virtuelle Produktentwicklung“ [ZAFIROV14, S. 86].

Die Entwicklung mechatronischer Systeme hat gezeigt, dass eine frühzeitige Arbeitsaufteilung auf disziplinäre Umfänge die Erarbeitung eines Gesamtoptimums für die Lösung verhindern kann, wenn disziplinär geprägte Festlegungen resultieren, die aus Gesamtsicht als nicht hinreichend gut zu bewerten sind [LINDEMANN16, S. 870]. Die endgültige Festlegung disziplinspezifischer Arbeitsumfänge sollte daher zu einem Entwicklungszeitpunkt erfolgen, nachdem auf Wirkebene physikalische Effekte interdisziplinär ausgewählt wurden, die beispielsweise nicht mehr zu konstruktiven oder regelungstechnischen Herausforderungen führen [LINDEMANN16, S. 870 f.].

2.2.2.3 W-Modell für die Entwicklung adaptronischer Systeme

Ein weiteres, vom V-Modell abgeleitetes und detaillierteres Vorgehensmodell stellt das von Nattermann und Anderl [NATTERMANN10] bzw. Anderl et al. [ANDERL12] vorgestellte W-Modell dar [EIGNER14B, S. 43]. Das in Bild 2.8 dargestellte Modell soll die Entwicklung adaptronischer Systeme unterstützen und baut auf dem 3-Ebenen-Vorgehensmodell nach Bender [BENDER05] auf [NATTERMANN10, S. 8].

Die Gründe für die Weiterentwicklung des V-Modells der Richtlinie VDI 2206 zum W-Modell liegen in der Erkenntnis, dass während der Phase des domänenspezifischen Entwurfs die Entwicklung von Komponenten voneinander unabhängig erfolgen kann, diese

in umgesetzter Form auch ihren jeweiligen Anforderungen genügen, aber sich während der Systemintegration nicht problemlos zu einem Gesamtsystem zusammenfügen lassen. Bedingt wird dies durch eine mangelhafte Berücksichtigung von Abhängigkeiten und einer unzureichenden Kommunikation zwischen den Disziplinen. Als Konsequenz resultieren Iterationen mit nachträglichen Anpassungen der disziplinspezifischen Lösungen. [ANDERL12, S. 1 ff.]

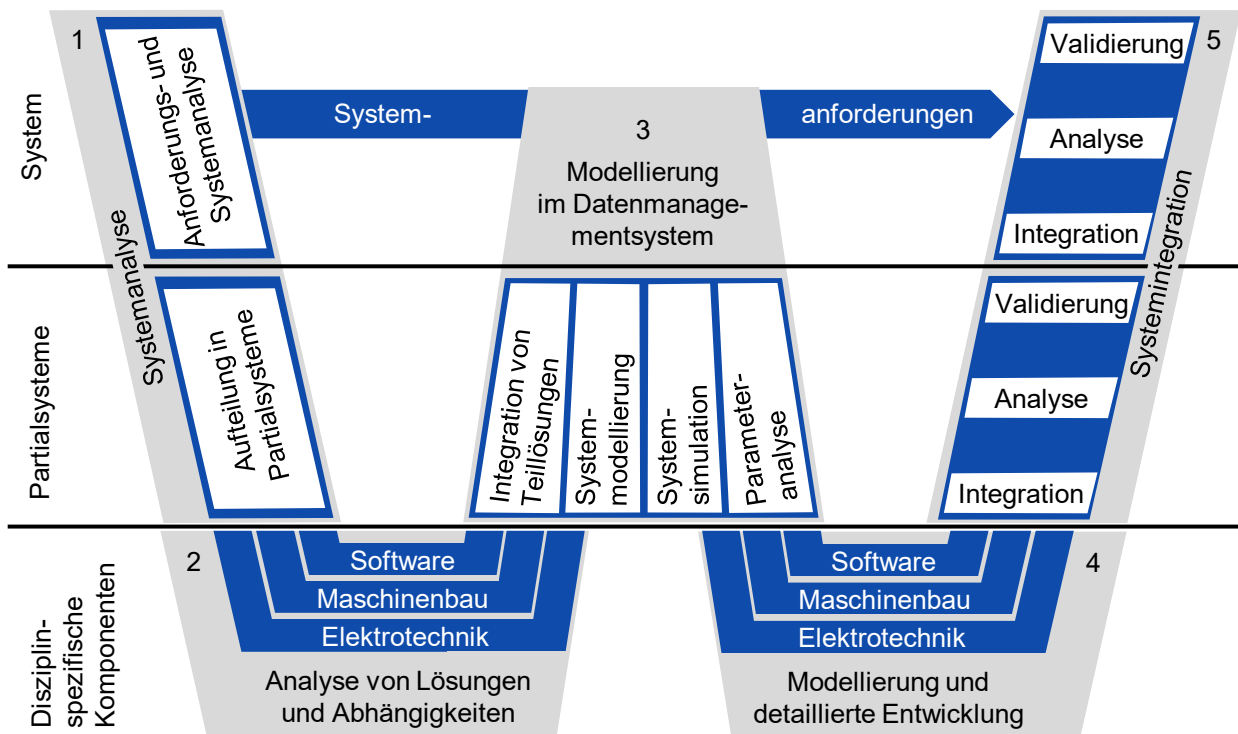


Bild 2.8: W-Modell nach Anderl et al. [ANDERL12, S. 2; vgl. EIGNER14B, S. 44]

Das W-Modell ist zwar zu Beginn und zum Abschluss weitgehend identisch mit dem V-Modell, sieht jedoch eine frühzeitige Integration von Modellen der Teillösungen zur virtuellen Absicherung des interdisziplinären Ergebnisses vor [ANDERL12, S. 2]. In dieser im Vergleich zum V-Modell eingeschobenen Phase werden die Systemeigenschaften und Schnittstellen des adaptiven Systems untersucht sowie diejenigen identifiziert, die einen signifikanten Einfluss auf das Systemverhalten haben und sich im Fall von Änderungen auf andere Fachdisziplinen auswirken [NATTERMANN10, S. 6]. Außerdem beinhaltet das W-Modell ein Datenmanagementsystem zur Verwaltung, Analyse und Synchronisierung von Datensätzen aller Fachdisziplinen, um die spätere Systemintegration der disziplinspezifischen Lösungen zu gewährleisten [ANDERL12, S. 2].

2.2.2.4 Fazit zu den vorgestellten Vorgehensmodellen

Am Beispiel der erläuterten Vorgehensmodelle ist ersichtlich, dass diese unterschiedlichen Zielsetzungen unterliegen [LINDEMANN09, S. 38], wie z. B. die Definition von Arbeits-

abschnitten und -ergebnissen sowie das Vorschlagen von Methoden zur systematischen Lösung eines mechanischen Produkts (VDI 2221) bzw. die Integration verschiedener Disziplinen (V- bzw. W-Modell). Vorgehensmodelle sind folglich dadurch gekennzeichnet, dass ausgewählte Informationen betont und andere nicht bzw. unvollständig abgebildet werden [BENDER16, S. 405].

2.2.3 Abgrenzung von Produktentwicklungsprozessen

Produktentwicklungsprozesse sind vielfältig und können je nach Komplexität des Produkts übersichtlich oder sehr umfangreich ausgeprägt sein [LINDEMANN09, S. 33]. Die Prozesse stellen ein notwendiges Hilfsmittel dar, um komplexe Entwicklungsaufgaben sowie die zur Bearbeitung erforderlichen Spezialisten bzw. sonstige beteiligte Personen, notwendige Aktivitäten, Informationsflüsse und Ressourcen zu koordinieren, Methoden und sonstige Hilfsmittel zielgerichtet einzusetzen sowie Entscheidungen nachvollziehbar zu treffen [BENDER16, S. 404]. Die Prozesse sind typischerweise branchen- und insbesondere unternehmensspezifisch geprägt, unterteilen die jeweiligen Abläufe der Entwicklung in einzelne, logisch abgrenzbare Abschnitte sowie handhabbare Arbeitspakete [LINDEMANN09, S. 33] und definieren klare Arbeitsergebnisse sowie Schnittstellen [BENDER16, S. 402]. Vorgehensmodelle sind daher im Vergleich zu Produktentwicklungsprozessen allgemeiner und in abstrahierter Form beschrieben [LINDEMANN09, S. 36]. Die stark abstrahierte Darstellung bei idealisierten generischen Modellen fördert ein allgemeingültiges Verständnis der Logik ohne unternehmens-, anwendungs- oder produktspezifischen Kontext [BENDER16, S. 415]. Entsprechend sind die Modelle bei der Einführung als spezifischer Produktentwicklungsprozess für den Anwendungszweck situativ anzupassen [BENDER16, S. 414 ff.].

Parallel zum Produktentwicklungsprozess laufen vor-, nach- bzw. nebengelagerte Prozesse [BENDER16, S. 403], die neben der Produktentwicklung auch die Produktplanung und Produktion unterstützen [JACKSTIEN14, S. 82]. Diese sogenannten Begleit- und Querschnittsprozesse beinhalten unter anderem das sogenannte Requirements Engineering, das als Bestandteil der Arbeit in Kapitel 2.6 näher betrachtet wird.

2.2.4 Hauptschritte der Problemlösung

Das Abstrahieren von Vorgehensmodellen führt zu drei in der Reihenfolge unabhängigen Hauptschritten eines Standardprozesses, die „Ziel bzw. Problem klären“, „Lösungsalternativen generieren“ und „Entscheidung herbeiführen“ lauten [LINDEMANN09, S. 41]. Zur Veranschaulichung der Schritte beinhaltet Bild 2.9 den Problemlösezyklus nach Daenzer

[DAENZER02, S. 48], welcher im Kontext des Systems Engineerings entstand und „als Leitfaden für die Bearbeitung jeglicher Art von Problemen“ [LINDEMANN09, S. 43] dient, sowie den davon abgeleiteten Vorgehenszyklus für die Systemsynthese (Lösungssuche) nach Ehrlenspiel [EHRENSPIEL17, S. 110]. Beide beschreiben ein Grundmuster zur Problemlösung, deren Schritte sich den (hier knapper formulierten) Hauptschritten „Zielsuche“, „Lösungssuche“ und „Auswahl“ zuordnen lassen. Nach dem Auftreten des Problems bzw. Anstoß der Aufgabe erfolgt innerhalb der Zielsuche die Situationsanalyse, der sich die Zielformulierung anschließt. Aufbauend erfolgen im Rahmen der Lösungssuche die Synthese und Analyse von Lösungen. Im letzten Hauptschritt Auswahl werden Lösungen bewertet und folglich die Entscheidung herbeigeführt.

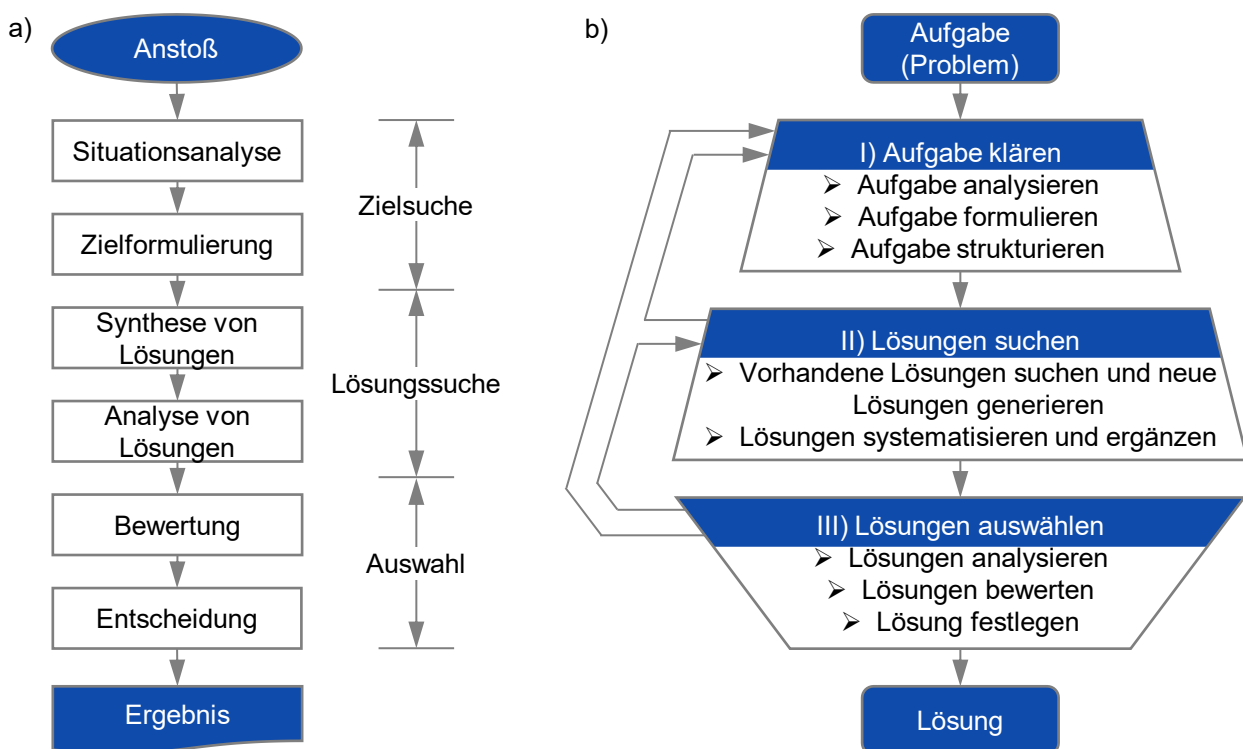


Bild 2.9: a) Problemlösezyklus nach Daenzer und Huber [DAENZER02; S. 48] und b) abgeleiteter Vorgehenszyklus für die Systemsynthese (Lösungssuche) nach Ehrlenspiel und Meerkamm [EHRENSPIEL17, S. 110]

Da beim Konstruieren typischerweise von „Aufgaben“ statt „Problemen“ die Rede ist, bezeichnet Ehrlenspiel das Modell „Vorgehenszyklus für die Systemsynthese“ und erweitert den Zyklus um den Teilschritt „Aufgabe strukturieren“ [EHRENSPIEL17, S. 107]. Die Darstellungsform vermittelt zwar einen sequenziellen Ablauf [LINDEMANN09, S. 43], Rekursionen und Iterationen sind geplant und ungeplant jedoch Bestandteil in der praktischen Anwendung und führen dazu, in der Situation zielsicherer zu werden bis sich der Problemcharakter verliert [EHRENSPIEL17, S. 114]. Für eine detaillierte Beschreibung der

Schritte wird auf einschlägige Literatur [EHRENSPIEL17, S. 106 ff.; LINDEMANN09, S. 42; VDI 2221-1 2019, S. 9] verwiesen.

2.2.5 Methodeneinsatz in der Produktentwicklung

Die Produktentwicklung lässt sich durch die Anwendung von zahlreich vorhandenen Produktentwicklungsmethoden (Definition vgl. Kapitel 2.1.3) unterstützen, um systematisch und nachvollziehbar Ergebnisse zu erzielen [ALBERS14, S. 3]. Methoden, zugehörige Grundlagen und deren Anwendung werden umfangreich in der einschlägigen Literatur [GAUSEMEIER01; SCHÄPPI05; PAHL07; LINDEMANN09; LINDEMANN16; ZIER14; EHRENSPIEL17] erläutert. Methoden existieren für eine Vielzahl zu unterstützender Aktivitäten und Situationen. Beispiele solcher Aktivitäten sind die Problemanalyse, Lösungssuche, Bewertung und Selektion (vgl. Kapitel 2.2.4) sowie die Fehlererkennung zur Qualitätssicherung [PAHL07, S. 306]. Insbesondere einfache Methoden werden von (erfahrenen) Entwicklern auch intuitiv eingesetzt [LINDEMANN09, S. 59].

Die große Anzahl existierender Methoden verdeutlicht, dass oftmals unterschiedliche Alternativen bestehen, um ein Ziel zu erreichen [VAJNA14A, S. 29]. Außerdem setzen sich Methoden teilweise wiederum aus mehreren anderen (Einzel-) Methoden zusammen [GRANER13, S. 14], weshalb Lindemann [LINDEMANN09, S. 58] einzelne Methoden auch als Netzwerke anderer Methoden bzw. deren modulare Teilschritte beschreibt. Dadurch lässt sich die Anwendung von Methoden flexibel gestalten [vgl. VAJNA14A, S. 30].

Lindemann nennt wesentliche Gründe für den Einsatz von Methoden [LINDEMANN09, S. 58 f.]:

- Aufgrund der begrenzten kognitiven Fähigkeiten des Menschen bieten Methoden ein Hilfsmittel, um komplexe Probleme durch Aufteilen in überschaubare Teilprobleme besser handhaben zu können, Denkbarrieren zu überwinden sowie Handlungsschwerpunkte und Zielkonflikte zu erkennen.
- Methoden unterstützen bzw. ermöglichen überhaupt die Kooperation an einem Prozess beteiligter Akteure in Form eines Hilfsmittels für deren erfolgreiche Kommunikation und Koordination. Außerdem werden der Umgang mit Informationen und Wissen, eine nachvollziehbare Dokumentation sowie das Treffen von Entscheidungen gefördert.
- Als Resultat der Methodeneinsätze werden gesteckte Ziele besser erreicht und verbindliche Arbeitsdokumente erstellt, wodurch das Risiko beim Entwicklungsvorgehen sinkt.

Methoden lassen sich für einen spezifischen Anwendungszweck mittels Kriterien auswählen. Dazu zählen Aspekte, ob die Methode den richtigen Vorgehensschritt unterstützt sowie das gewünschte Ergebnis liefert, die notwendigen Eingangsinformationen vorliegen bzw. beschaffbar sind und organisatorische Voraussetzungen, wie die Bekanntheit oder die Teamgröße, gegeben sind [EHRENSPIEL17, S. 437]. Außerdem existiert eine Softwareunterstützung, die situationsspezifisch unter Berücksichtigung von Phasen und Aktivitäten des Produktentwicklungsprozesses, geeigneten Anwendungszeitpunkten sowie weiteren Kriterien passende Methoden vorschlägt und den Überblick über die Vielzahl vorhandener Methoden gewährleisten soll [ALBERS15, S. 1 ff.].

2.2.6 Lösungsansatz der integrierten Produktentwicklung

Die integrierte Produktentwicklung wird von Ehrlenspiel und Meerkamm [EHRENSPIEL17, S. 233] als Lösungsansatz beschrieben, um Herausforderungen bei der durch die Wissensexplosion getriebenen, arbeitsteiligen Produktentwicklung zu bewältigen. Auch zukünftig ist eine Zunahme beteiligter Personen und Disziplinen an Entwicklungsprojekten [SPATH16, S. 4] sowie deren Spezialisierung [Ehrlenspiel17, S. 233] zu erwarten. Da ein Produkt nicht nur aus Teilen besteht, sondern aus unterschiedlichen Prozessen resultiert, zahlreiche Eigenschaften aufweist und von der Produktplanung bis zum Recycling viele Lebenszyklusphasen durchläuft, sind zur Bewerkstelligung der Spezialisierung integrierende Methoden, Organisationsformen, Techniken und insbesondere Formen der Zusammenarbeit erforderlich [EHRENSPIEL17, S. 233 f.]. Dem Lösungsansatz liegt die Idee zugrunde, alle Ressourcen und Prozesse für eine erfolgreiche Entwicklung und Vermarktung „integriert“, das heißt verzahnt, effizient und aufeinander abgestimmt zu gestalten [SCHÄPPI05, S. 13 ff.].

Ehrlenspiel und Meerkamm [EHRENSPIEL17, S. 234] verstehen unter der integrierten Produktentwicklung die zielorientierte Kombination organisatorischer, methodischer und technischer Maßnahmen bzw. Hilfsmittel, die von ganzheitlich denkenden Produktentwicklern genutzt werden. Folglich besteht der Ansatz aus den Bereichen Mensch, Methodik, Organisation und Technik. Die integrierte Produktentwicklung erfordert ein partnerschaftliches, interdisziplinäres Arbeiten innerhalb des Unternehmens als auch mit Kunden und Zulieferern. Außerdem muss diese Denkweise mit Hilfe methodisch unterstützter Vorgehensweisen den gesamten Produktlebenszyklus fokussieren und Wechselwirkungen zwischen Produkt und Prozessen berücksichtigen. Bereits im Stadium der Entwicklung werden für das spätere Produkt Wartungszyklen, Servicefunktionen und ggf.

Dienstleistungskonzepte erarbeitet. Für die Umsetzung des Ansatzes ist eine Organisationsform erforderlich, die die Parallelisierung von Arbeitsprozessen zulässt und den Einsatz von geeigneten Methoden und IT-Werkzeugen fördert. [EHRENSPIEL17, S. 235]

Eigner [EIGNER14A, S. 5] stellt weitere Definitionen der integrierten Produktentwicklung gegenüber und Vajna und Burchardt [VAJNA14A, S. 15 ff.] beschreiben darüber hinaus deren Entstehung und Weiterentwicklung. Aufgrund einer fehlenden Konvergenz oder Konsolidierung existiert derzeit noch keine einheitliche Definition für den Begriff [VAJNA14A, S. 17]. Die Gemeinsamkeit der Definitionen beruht jedoch auf dem „integrativen Aspekt der Produktentwicklung in den Produktlebenszyklus“ [EIGNER14A, S. 6]. In dieser Arbeit wird auf die Beschreibung nach Ehrlenspiel und Meerkamm [EHRENSPIEL17, S. 234] aufgebaut, die als weit verbreitet gilt [VAJNA14A, S. 25].

Das Ergebnis der integrierten Produktentwicklung sind kürzere Entwicklungszeiten, niedrigere Herstellkosten und eine höhere Qualität des Produkts [ROMMEL93, S. 75 f.]. Zur (überzeichneten) Veranschaulichung greift Bild 2.10 das Prinzip der durch die integrierte Produktentwicklung angestrebten Zusammenarbeit beteiligter Disziplinen nach Ehrlenspiel und Meerkamm [EHRENSPIEL17, S. 231 bzw. 277] auf, indem geistige Mauern zwischen Abteilungen zur Verbesserung des Informationsflusses aufgelöst werden und bereichsübergreifend im Team zusammengearbeitet wird - eine Voraussetzung für das Simultaneous Engineering (siehe Kapitel 2.5.3).

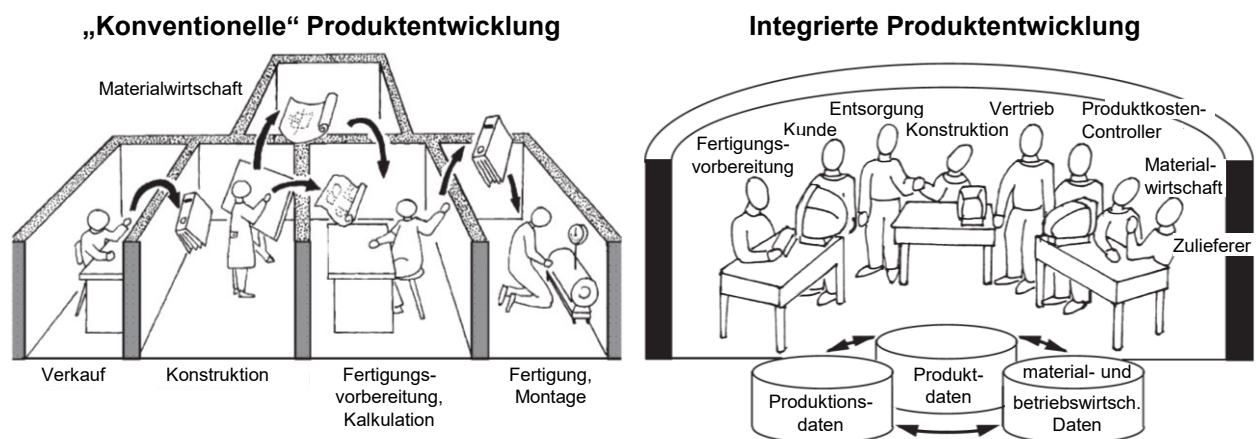


Bild 2.10: Funktional getrennte und integrierte Zusammenarbeit [EHRENSPIEL17, S. 231 bzw. 277]

2.3 Grundlagen zur Gebäudeplanung

Als Pendant zu Kapitel 2.2 fasst dieses Kapitel Grundlagen zur Gebäudeplanung zusammen. Aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen, Anforderungen und Ziele eines jeweiligen Planungsprojekts [vgl. LORENZ10, S. 38 f.], der projektspezifischen Zusam-

mensetzung des Planungsteams [KLEIN08, S. 21] und dem individuellen Vorgehen der Planungsbeteiligten, zum Beispiel während des Entwurfs [LORENZ10, S. 34 f.; LEISTNER20, S. 3 f.], existiert kein einheitliches Planungsvorgehen [vgl. BERGMANN13, S. 61]. Die Planung beginnt jedoch im Allgemeinen mit der Analyse des Bedarfs und den Randbedingungen eines zu realisierenden Gebäudes. Dem Planungsprozess folgt der Ausführungsprozess, wobei sich beide Prozesse meist überlappen [ERDELL06, S. 86]. Der Planungsprozess beinhaltet demzufolge alle nach dem Aufkommen eines Bedarfs für die Realisierung des Gebäudes notwendigen vorbereitenden Schritte [vgl. LORENZ10, S. 11]. Hinsichtlich des der Planung zugrunde liegenden Ansatzes kann zwischen dem traditionellen sequenziellen sowie dem integralen Vorgehen unterschieden werden. Der Unterschied betrifft insbesondere die Prinzipien der Zusammenarbeit der im Wesentlichen an der Planung beteiligten Architekten und Ingenieure. In den nachfolgenden Unterabschnitten werden beide Planungsansätze beschrieben.

2.3.1 Ansatz der traditionellen sequenziellen Planung

Im nach wie vor dominierenden Planungsansatz [HEIDEMANN14, S. 12] integriert der Architekt einzelne Leistungen der Ingenieure in den von ihm maßgeblich bestimmten und verantworteten Entwurf bzw. die Gesamtplanung [HOAI13, Anlage 10; ERDELL06, S. 58]. Der Ansatz beruht auf der traditionell nach Gewerken getrennten Planung. Durch die additive Ergänzung der Ingenieurleistungen resultiert ein sequenzielles Vorgehen [SAVANOVIC09; BERGMANN13, S. 47], dessen Ergebnisse in der Mikroperspektive durch iterative Zyklen aus vernetzten Prozessen geprägt sind [vgl. BERGMANN13, S. 81].

Der übergeordnete, aus der Makroperspektive betrachtete Planungsablauf orientiert sich in Deutschland an den Leistungsphasen der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) [HOAI13]. Die Verordnung reguliert (bis zum Urteil des EuGH 2019 verbindlich und seit 2021 als Orientierung) die Honorierung der an der Planung beteiligten Architekten und Ingenieure auf Grundlage individueller Leistungsbilder. Leistungsphasen (LPH) untergliedern diese wiederum in die in der jeweiligen Phase zu erbringenden Leistungen. Bild 2.11 stellt das typischerweise die Architektur betreffende Leistungsbild „Gebäude und Innenräume“ in neun Leistungsphasen dar. Das dem Leistungsbild zugeordnete Gesamthonorar [vgl. HOAI13, § 6] wird durch die angegebenen Prozentwerte anteilig auf die jeweiligen Leistungsphasen aufgeteilt. Die Anteile stehen im Grundsatz für den jeweils zu erbringenden Aufwand. Gemessen am Honoraranteil zur Gesamtleistung hat der Entwurfsprozess mit den Leistungsphasen 1 bis 3 einen relativ geringen Anteil [vgl.

LORENZ10, S. 12]. Neben den abgebildeten „Grundleistungen“ sind in der HOAI für jede Leistungsphase separat zu vergütende „besondere Leistungen“ aufgelistet, die als projektspezifische Zusatzleistungen zu verstehen sind.

Für die Darstellung in Bild 2.11 wurden die Leistungsbeschreibungen in der textuellen Wiedergabe gekürzt, weshalb für die vollständige Wiedergabe der Grundleistungen sowie der besonderen Leistungen auf die HOAI [HOAI13, Anlage 10] verwiesen wird. Neben dem vorgestellten Leistungsbild beschreibt die HOAI unter anderem auch die Leistungsbilder Tragwerksplanung, Ingenieurbauwerke und Technische Ausrüstung. Das Leistungsbild Tragwerksplanung [HOAI13, Anlage 14] ist aufgrund des Kontexts zur Arbeit analog zu Bild 2.11 in Anhang A.2 abgebildet.

Die HOAI verfolgt nicht das Ziel eines organisatorischen Optimums, sondern bildet die Grundlage für die erwähnte Abrechnung der definierten Leistungen [BERGMANN13, S. 47]. In der Baupraxis stellt das Planungsvorgehen entgegen des in der HOAI vereinfacht sequenziell dargestellten Prozesses keine lineare Kette von Entscheidungen dar, sondern eine Struktur vernetzter, iterativer Prozesse [BERGMANN13, S. 81]. In der Regel werden nicht alle für eine Leistungsphase zu erbringenden Leistungsbilder vollständig abgeschlossen, ehe mit nachfolgenden Leistungsphasen begonnen wird [LANDOWSKI17, S. 4]. Der Inhalt der Honorarordnung ist darüber hinaus leistungs- und nicht berufsbezogen, was bedeutet, dass die HOAI keinen Hinweis darüber gibt, „welcher Akteur zu welchem Zeitpunkt über welche Information verfügt“ [BERGMANN13, S. 51] sowie auch, dass keine Schnittstellen definiert sind. Da die Zusammenarbeit der Beteiligten in der Regel mit jedem Projekt zeitlich begrenzt ist, sind deren Prozesse nicht aufeinander abgestimmt [BERGMANN13, S. 61]. Die Gesetze (Vergabeordnung und demzufolge auch die Honorarordnung) sehen außerdem eine Trennung zwischen Entwurf und Ausführung vor. Beide Aspekte führen zu einem verminderten Informationsaustausch der Planungsbeteiligten [BERGMANN13, S. 81]. Die Bauleistungen werden vom Auftraggeber beschrieben und sind vom Auftragnehmer entsprechend auszuführen [AKBW09]. Die frühzeitige Einbeziehung von Wissen der an der Ausführung beteiligten Unternehmen ermöglicht hingegen eine begünstigende Beeinflussung der Kosten, der architektonischen Qualität sowie der Qualität der Nachhaltigkeit [vgl. BERGMANN13, S. 81]. Dieses Ziel wird von integralen Ansätzen aufgegriffen.



Bild 2.11: Leistungsbild „Gebäude und Innenräume“ nach HOAI [HOAI13, Anlage 10]

2.3.2 Ansatz der integralen Planung

Das Ziel der integralen Planung sind zweckmäßige, funktionierende, wirtschaftliche und ökologisch nachhaltige Gebäude, indem bei der Planung stärker auf Anforderungen der Bauherren und des Lebenszyklus des Gebäudes fokussiert sowie von Anfang an durch Einbindung von Fachplanern ein Planungsteam gebildet wird [HEIDEMANN14, S. 14 f.].

Im Vergleich zum traditionellen Ansatz resultieren aus der intensiveren Koordination vielseitige Vorteile [HEIDEMANN14, S. 60 f.; AIA07, S. 15 ff.; WEEBER05, S. 2]:

- geringere Planungsaufwände (mittelfristig) und kürzere Planungszeiten
- geringere Kosten, u. a. durch weniger Änderungen bzw. Korrekturen von Fehlern
- höhere Qualität der Planungsergebnisse, u. a. durch eine geringere Fehlerhäufigkeit und Berücksichtigung des Lebenszyklus (hinsichtlich Nachhaltigkeitsaspekten)

Die wichtigsten integralen Planungsansätze [BERGMANN13, S. 101] sind das in einem Leitfaden des American Institute of Architecture (AIA) [AIA07] erläuterte "Integrated Project Delivery" (IPD) sowie der in den Niederlanden entstandene Bauteam-Ansatz, welcher auch in Deutschland erprobt wurde [AKBW09, S. 13; WEEBER05, S. 30 ff.]. Beide streben eine frühzeitige Integration aller an der Planung beteiligten Fachdisziplinen und Stakeholder an.

2.3.2.1 Integrated Project Delivery

Das Integrated Project Delivery (IPD) stellt einen Ansatz zur Prozessoptimierung dar, der Beteiligte, Randbedingungen, Geschäftsstrukturen und -praktiken in einen Prozess integriert und dadurch Fähigkeiten und Erkenntnisse aller Beteiligten gemeinschaftlich nutzt. Das Ziel ist die Optimierung von Projektergebnissen, das Generieren eines Mehrwerts für den Eigentümer, das Minimieren von Verschwendung sowie das Maximieren der Effizienz in allen Schritten der Planung, Herstellung und Ausführung. Die in dem Leitfaden erläuterten Prinzipien lassen sich auf unterschiedliche Bauprojekte bzw. Projektformen und über den typischen Kreis an Beteiligten hinausgehend anwenden. Die zugrunde gelegte Erfolgsphilosophie beruht auf einer intensiven und effektiven Zusammenarbeit, die wesentliche Beteiligte miteinbezieht, in der frühen Planungsphase beginnt und bis zur Übergabe andauert. [AIA07, S. 2]

Dem IPD liegt die Vision des AIA in sechs Punkten zugrunde [AIA07, S. 2; vgl. BERGMANN13, S. 102]:

- Das Facility-Management, der Nutzer, das Bauunternehmen und Subunternehmen bzw. Zulieferer sind von Anfang an in den Entwurfsprozess involviert.

- Prozesse sind ergebnisorientiert und Entscheidungen werden nicht allein auf der Basis von Kosten getroffen.
- Die Kommunikation über den gesamten Prozess hinweg ist klar, präzise, offen, transparent und vertrauensvoll.
- Der Entwerfer versteht zum Zeitpunkt seiner Entscheidungen deren spätere Auswirkungen.
- Risiken und Entlohnungen sind über die gesamte Zeitspanne eines Projekts wertebasiert und unter den Beteiligten angemessen ausgeglichen verteilt.
- Als Ergebnis liefert die Bauindustrie eine in der Qualität gesteigerte und nachhaltigere gebaute Umwelt.

Das Building Information Modeling (BIM) ist ein zentrales Werkzeug des IPD [AIA07, S. 10 f.] und wird mit den einhergehenden Konsequenzen der Anwendung - dem Verlagern von Entscheidungen in frühe Entwurfsphasen - in Kapitel 2.3.4 näher erläutert. Die Prozessphasen im IPD weichen folglich von typischen Vorgehensweisen ab und Entscheidungen werden infolgedessen effektiver verfolgt bzw. lassen sich weniger kostenintensiv korrigieren. Heidemann et al. [HEIDEMANN14, S. 12 ff.] erkennen zwar durch die Zunahme an technischen Systemen in Gebäuden einen steigenden Bedarf zur integralen Planung und eine Tendenz zur zunehmenden Anwendung, am Beispiel der Planungsleistungen für die Technische Gebäudeausrüstung erörtern die Autoren jedoch die Hemmnisse für eine Durchsetzung, zu denen die typischerweise fehlende Bedarfsplanung sowie die HOAI zählen [HEIDEMANN14, S. 54]. Letztere fordert vom Objektplaner (Architekten) nur das „Bereitstellen der Arbeitsergebnisse als Grundlage für die anderen an der Planung fachlich Beteiligten (..) und Integration von deren Leistungen“ [HOAI13, Anlage 10], was nicht das Erarbeiten einer gemeinsamen Lösung unterstützt.

2.3.2.2 Bauteam-Ansatz

Auch der Ansatz des Bauteams unterscheidet sich zum konventionellen Vorgehen durch eine intensive Kommunikation und Kooperation der am Projekt beteiligten Architekten, Ingenieuren, ausführenden Unternehmen bzw. Handwerkern sowie (privaten und öffentlichen) Bauherren [AKBW09, S. 2], indem die Beteiligten durch eine partnerschaftliche Zusammenarbeit möglichst ab dem Stadium des Vorentwurfs eine technisch und wirtschaftlich optimierte Lösung anstreben und Synergieeffekte nutzen [AKBW09, S. 7]. Die Motivation für ein Bauteam resultiert aus Einsparungen und Sicherheiten bei den Baukosten als auch Planungs- und Bauzeiten sowie einer höheren Qualität im Ergebnis,

sodass unter anderem durch die Reduktion von Gewährleistungsansprüchen alle Beteiligten profitieren [WEEBER05, S. 2]. Aufgrund des Vergaberechts werden in der Regel Leistungen der Planung und der Ausführung auch bei diesem Ansatz wirtschaftlich getrennt [AKBW09, S. 113]. Dennoch sind die Vergabeordnung und die HOAI, ein unzureichender Austausch von positiven Erfahrungen bzw. generell die geringe Bekanntheit des Ansatzes beim Bauherrn, der diesen initiieren muss, wesentliche Gründe, die Weeber und Bosch [WEEBER05, S. 108 ff.] bezüglich der fehlenden Durchsetzung des Bauteam-Ansatzes nennen.

2.3.3 Erhebung des typischen Vorgehens in der Gebäudeplanung als Prozessmodell

Für die Erarbeitung von Methoden zur Planung und zum Entwurf adaptiver Tragwerke und Gebäudehüllen wurde im Forschungsprojekt in Prozessform ein Modell der konventionellen Gebäudeplanung erhoben. Die verfolgte Zielsetzung lautete, typische bzw. wesentliche Aktivitäten und Schnittstellen der bei der Planung beteiligten Disziplinen festzuhalten, um so analog zu existierenden Prozessdarstellungen der Produktentwicklung ein Referenzprozess der Gebäudeplanung zu erhalten. Da die Aufgabengebiete des Architekten und der Fachplaner sich auftragsabhängig stark unterscheiden, kann es jedoch keine exakt definierten Tätigkeitsbeschreibungen geben [vgl. ERDELL06, S. 58]. Der Prozess ist Bestandteil einer Veröffentlichung von Leistner et al. [LEISTNER20]. Als Informationsquelle dienten die in Abschnitt 2.3.1 vorgestellten Leistungsbilder für die Architektur, die Leistungsbilder der Tragwerksplanung und der technischen Ausrüstung [HOAI13, Anlage 14 bzw. 15], weitere Prozessbeschreibungen in der Literatur [vgl. LEISTNER20, S. 9 f.] sowie zur Verifikation geführte Interviews mit vier in der Baupraxis tätigen Architekten und Ingenieuren. Die Erhebung besteht im Wesentlichen aus den nachfolgend vorgestellten Prozessdiagrammen, die Aktivitäten spaltenweise verantwortlichen Disziplinen sowie zeilenweise den Leistungsphasen zuordnet und die Schnittstellen der Aktivitäten durch Pfeile kennzeichnet. Die in der Regel (vgl. Kapitel 2.2.3) angestrebte, allgemeingültige Darstellungsform von Vorgehensweisen erforderte auch bei der Erarbeitung dieses Prozesses eine Abstraktion. Das bedeutet, dass die Abläufe idealisiert dargestellt sind.

Die Prozessdarstellung beginnt mit der Grundlagenermittlung nach dem Aufkommen eines Bedarfs, schließt mit den Aktivitäten der Objektbetreuung nach der Errichtung des Gebäudes (bzw. den Verjährungsfristen) ab und umfasst somit die neun Leistungs-

phasen der HOAI. Aus Gründen der Formatierung ist die Prozessdarstellung in zwei Abschnitte gegliedert. Bild 2.12 stellt in einem ersten Abschnitt die Leistungsphasen 1 bis 5 vor, die zusammengefasst die Entwurfs- und die Ausführungsplanung darstellen. Bild 2.13 beinhaltet den zweiten Abschnitt. Darin umfassen zunächst die Leistungsphasen 6 und 7 die Aktivitäten zur Vergabe. Die als Objektüberwachung bezeichnete Leistungsphase 8 entspricht den planerischen Leistungen im Zeitraum der Bauausführung. Die Objektbetreuung (Leistungsphase 9) erfolgt im Wesentlichen nach Abschluss der Ausführung.

Für umfangreichere Beschreibungen der Aktivitäten wird auf die Veröffentlichung Leistner et al. [LEISTNER20] bzw. auf die Definition der Leistungsbilder nach HOAI [HOAI13] verwiesen. Im Weiteren werden weitere Randbedingungen des Prozesses erläutert.

Da typischerweise ein Vertreter der Architektur die Projektleitung übernimmt, sind die Informationsflüsse von dieser Disziplin ausgehend bzw. rückführend dargestellt. Die Planung wird zwar durch den Bauherrn und den Baubedarf ausgelöst, im Informationsfluss des Diagramms steht aber die Baubehörde aufgrund deren Vorgaben zur Bebauung mit dem Bebauungsplan und weiteren Bauvorschriften an vorderster Stelle.

Je nach Planungsobjekt ist es nicht untypisch, dass sich einzelne Phasen und deren Aktivitäten zeitlich überschneiden, verschieben oder sich wiederholen, sodass beispielsweise Planungsaktivitäten in einzelnen Gewerken sich noch im Stadium des Entwurfs, der Genehmigung oder Ausführungsplanung befinden und somit noch vor der Vergabe stehen, während (z. B. im Fall des Experimentalhochhauses) die Bauausführung mit der Gründung oder dem Rohbau bereits begonnen hat [vgl. BERGMANN13, S. 50].

Der Einsatz von Fachplanern ist stark abhängig vom Anforderungsprofil des Planungsobjekts, weshalb das im Prozess erwähnte Brandschutzgutachten und das Landschaftskonzept nur zwei immerwährende, beispielhafte Leistungen von Fachplanern darstellen. Die Prozessdarstellung berücksichtigt außerdem nicht weiter, inwiefern Planende als auch Bauausführende zu einem oder mehreren Unternehmen gehören. Dargestellt ist der Fall, dass die Gewerke spezifisch an Unternehmen vergeben werden und somit bei der Vergabe und der Bauüberwachung im Einzelnen zu berücksichtigen sind. Davon abweichend kann ein Generalunternehmer nach erfolgter Ausschreibung die vollumfänglichen Bauleistungen im Zuge der Errichtung verantwortlich übernehmen [vgl. LANDOWSKI17, S. 61]. Darunter fallen auch die in der Spalte des Architekten dargestellten Leistungen der Bauüberwachung. Darüber hinaus stellt der Totalunternehmer einen Bauunternehmer dar, der auch vorangehende Planungsleistungen erbringt [LANDOWSKI17, S. 61].

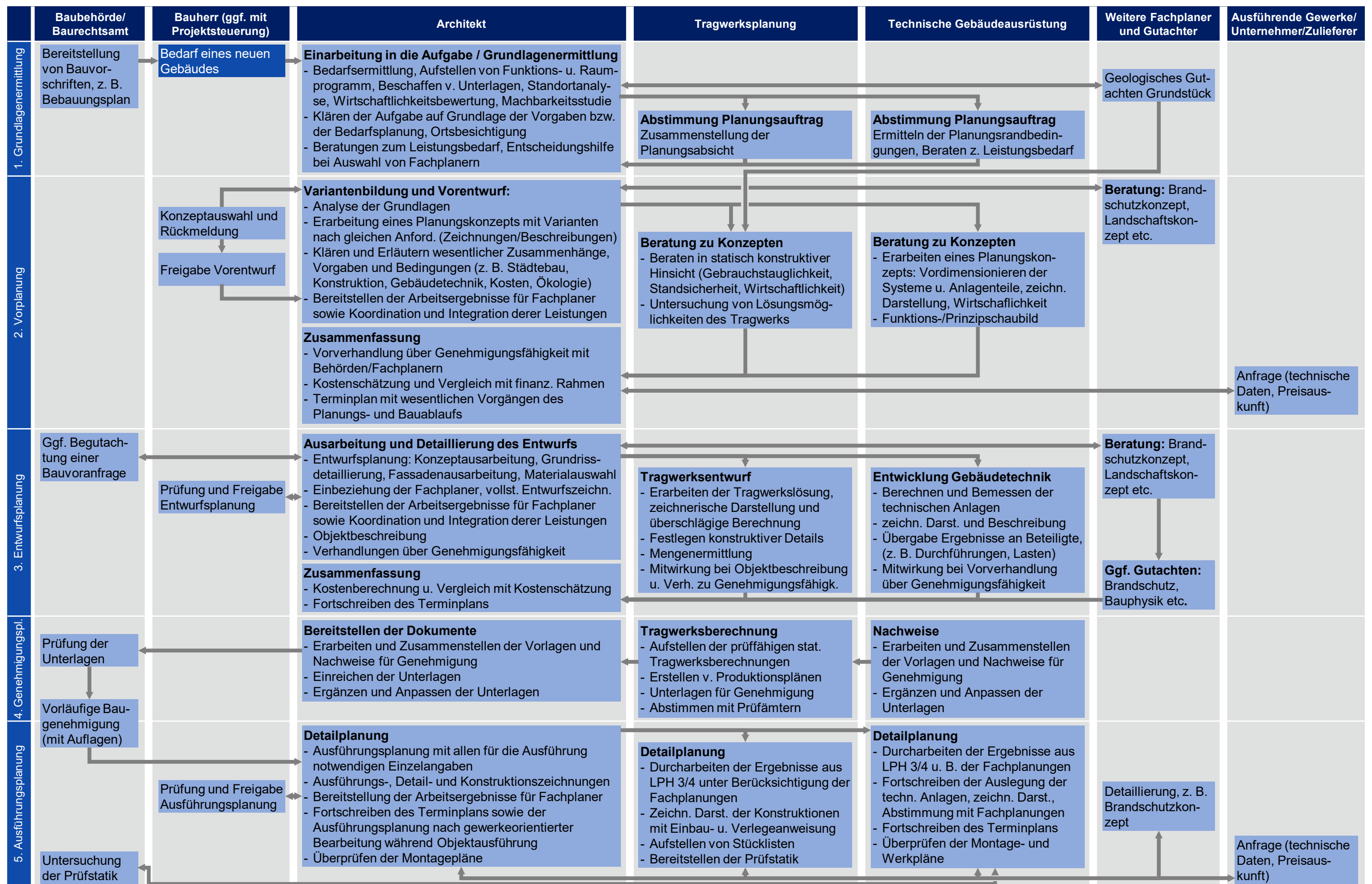


Bild 2.12: Typische Aktivitäten und Schnittstellen entsprechend der Leistungsphasen 1 bis 5 der HOAI [vgl. LEISTNER20, S. 11 f.]

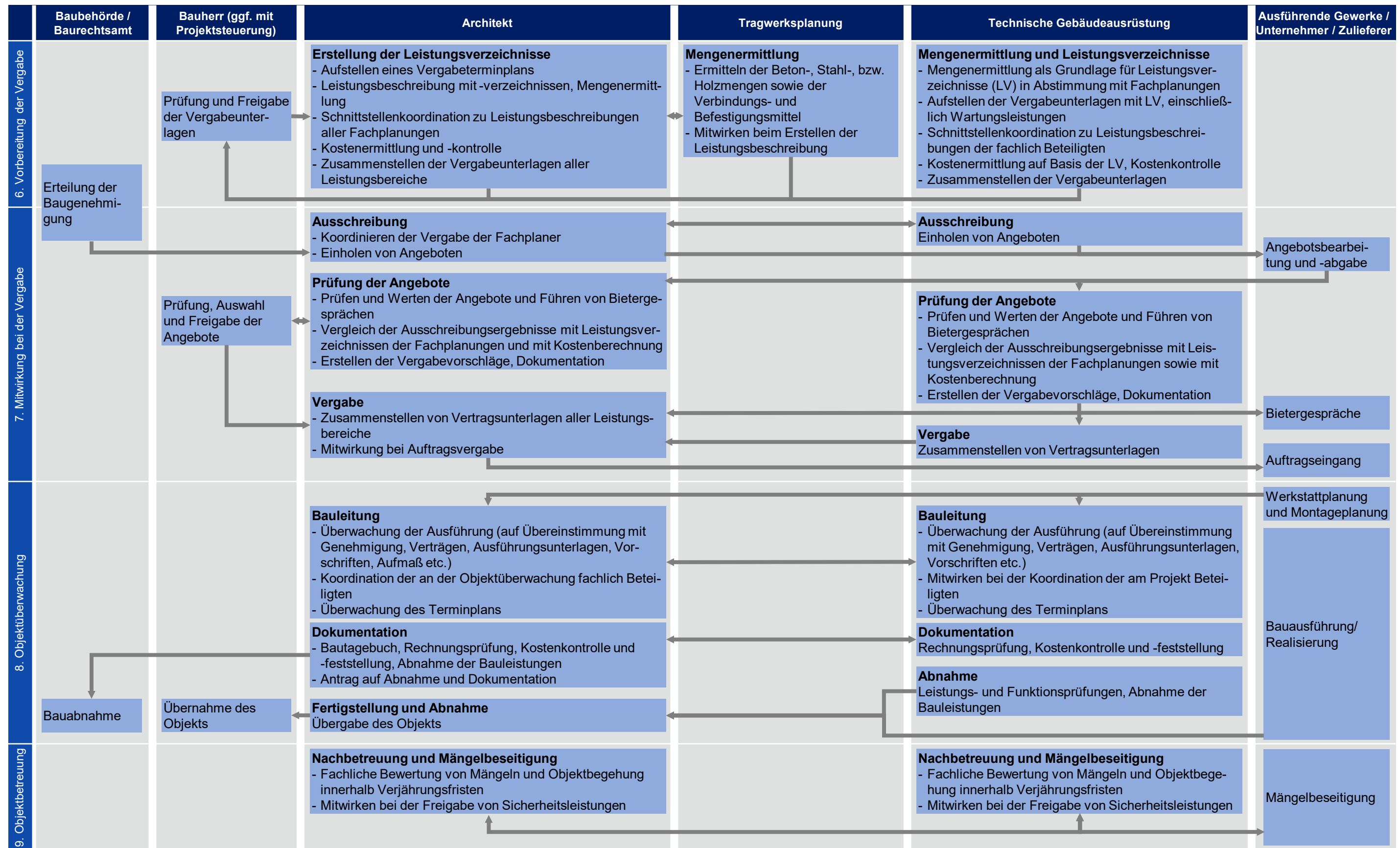


Bild 2.13: Typische Aktivitäten und Schnittstellen entsprechend der Leistungsphasen 6 bis 9 der HOAI [vgl. LEISTNER20, S. 12 f.]

2.3.4 Definition des Building Information Modeling und der MacLeamy-Kurve

Dem Building Information Modeling („Gebäude- bzw. Bauwerksinformationsmodell“, BIM) liegt die Idee eines umfassenden digitalen Abbilds eines Bauwerks mit hoher Informationstiefe zugrunde, das für eine durchgängige Nutzung über den gesamten Lebenszyklus bestimmt ist. Neben der dreidimensional zusammengesetzten Geometrie des Gebäudes sind im Modell auf Bauteilebene Zusatzinformationen wie technische Eigenschaften bzw. Daten sowie Kosten festgehalten. Der Vorteil durch die Nutzung von BIM beruht in einem erheblich verbesserten Datenaustausch, indem an einem Projekt beteiligte Planer an einem gemeinsamen Datensatz arbeiten. Pläne der Beteiligten sind somit frei von Widersprüchen und Kollisionen. Darüber hinaus können am Modell unter anderem auch statische Nachweise sowie Wärmebedarfsermittlungen berechnet bzw. simuliert werden. Neben dem Entwurf bzw. der Planung unterstützt ein aktuell gehaltenes Abbild des realen Gebäudes auch bei der Ausführung, der Betriebs- und Nutzungsphase und dem Rückbau. [BORRMANN15, S. 1 ff.; VDI17, S. 20]

Als Entwurfswerkzeug kann BIM auf einen Katalog parametrisierter Bauteile wie Wände oder Fenster zugreifen [RANK12, S. 31]. Die Konsequenz der Nutzung von BIM ist, dass bereits in frühen Phasen der Planung eine Detaillierung erfolgt und somit die Aufwände verlagert werden [BORRMANN15, S. 6]. Die in Bild 2.14 abgebildete MacLeamy-Kurve [MACLEAMY04] veranschaulicht den Effekt grafisch. Während beim konventionellen Planungsvorgehen, angelehnt an die Leistungsphasen, die wesentlichen detaillierenden und zeitintensiven Planungsschritte in der Ausführungsplanung erfolgen, sind bei der durch BIM unterstützten Planung wesentliche Details bereits zum Ende der Entwurfsphase definiert. Zu diesem Zeitpunkt lassen sich Änderungen an der Gestalt und Optimierungen hinsichtlich der Realisierungs- und Betriebskosten zu vergleichsweise geringen Mehrkosten für die resultierenden Änderungsaufwände bewerkstelligen. Die frühe Integration von Leistungen bzw. Informationen von Architekten, Fachplanern, Bauunternehmen und Lieferanten [AIA07, S. 22] decken mit der gemeinsamen Auseinandersetzung Verbesserungspotenziale auf, wodurch Vorteile hinsichtlich Kosten, Zeitplan und Qualität resultieren [AIA07, S. 24]. Auch Heidemann et al. bezeichnen die Konzeption als wichtige Phase für den Erfolg einer Planung, „da in diesem Zeitraum die Weichen für ein Bauprojekt und damit für die Erreichung der Ziele (...) gestellt werden [HEIDEMANN14, S. 12].

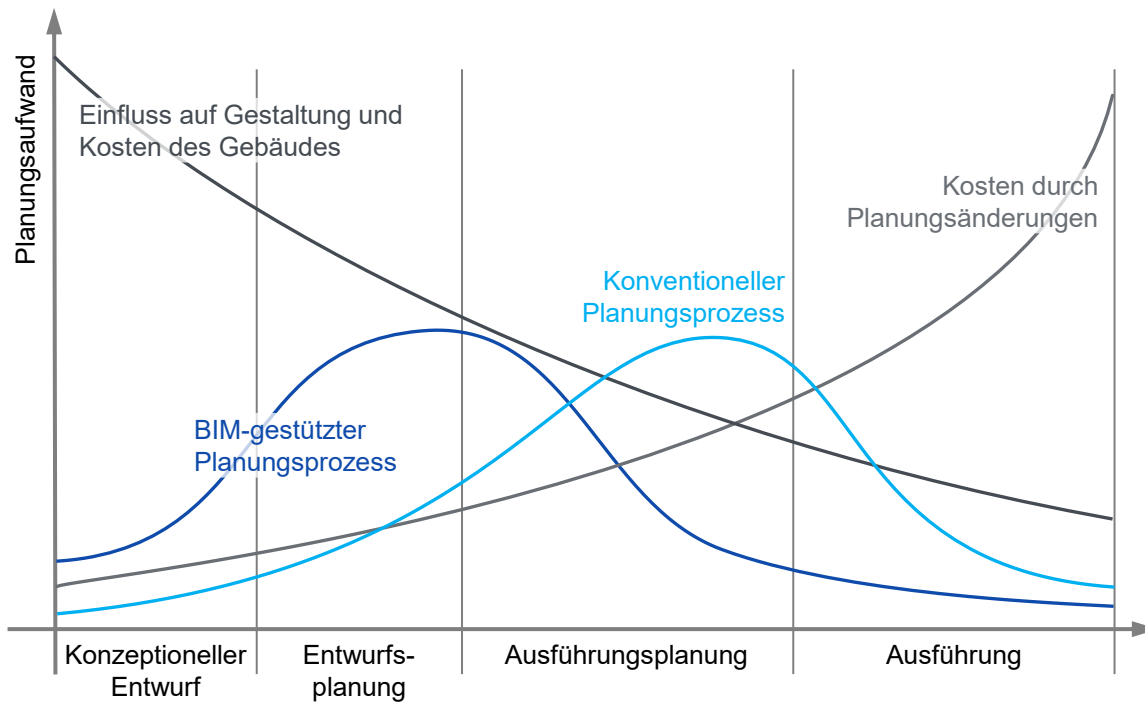


Bild 2.14: MacLeamy Kurve: Einflüsse über Planungsfortschritt nach MacLeamy
[MACLEAMY04]

2.4 Interdisziplinärer Vergleich von Vorgehensmodellen

In Studien [CROSS92; WYNN05; GERICKE11; EISENBART11; GERICKE12] wurden zahlreiche Vorgehensmodelle unterschiedlicher Disziplinen verglichen, die unter anderem dem Maschinenbau und der Architektur zuzuordnen sind. Die ursprünglichen Vorgehensmodelle der Architektur und dem Maschinenbau haben gemeinsame Anfänge [CROSS92, S. 325] und verfolgten die Ziele, den Entwurfsprozess zu beschreiben und zu lehren [CROSS92, S. 329]. Auf abstrakter Ebene sind die generisch beschriebenen Phasen und das zugrundeliegende schrittweise, iterative Vorgehen bestehende Gemeinsamkeiten [GERICKE11, S. 9]. Nachdem in den Vorgehensmodellen beider Disziplinen zunächst die ausführliche Ermittlung von Nutzeranforderungen und weiteren Randbedingungen vor der Bildung von Lösungskonzepten vorgeschlagen wurde, setzte sich in der Architektur ein frühzeitiges Entwerfen auf Grundlage von Annahmen durch [CROSS92, S. 332]. Im Maschinenbau gewann in der Konzeptphase das Auflösen einer Voreingenommenheit sowie das Zergliedern des Gesamtproblems in untergeordnete Teilprobleme an Bedeutung, um die Probleme überhaupt lösen zu können [CROSS92, S. 330]. Ein einfacher Grund für diese Auseinanderentwicklung könnte laut Cross und Roozenburg [CROSS92, S. 332] in den Wissensgebieten der Berufe liegen, da den Architekten für ihre wesentlichen Probleme das Gleichwertige der Ingenieurwissenschaften fehlt bzw. die Ausbildung kunstbezogen

geprägt ist. Folglich verlassen sich Architekten beim Entwerfen auf Trial-and-Error-Verfahren und neigen dazu, ihre Entwurfsprobleme als von Natur aus schlecht definierte Probleme zu betrachten [CROSS92, S. 332].

Eisenbart et al. [EISENBART11, S. 6] sowie darauf aufbauend Gericke und Blessing [GERICKE12, S. 177] führen eine Gegenüberstellung von Vorgehensmodellen beider (und weiteren) Disziplinen durch, indem Phasen ähnlicher Zielsetzung identifiziert werden. Unter Berücksichtigung der für die tabellarische Darstellungsform vorgenommenen Abstraktion zeigt das Ergebnis, welche Modelle disziplinspezifische Phasen beinhalten und wie häufig vergleichbare Phasen Bestandteil verschiedener Modelle sind. Aus dem Vergleich der Modelle aus dem Maschinenbau und der Architektur lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen [EISENBART11, S. 5]:

- Die meisten Phasen, die sinngemäß bzw. mit vergleichbarer Zielsetzung in Modellen beider Disziplinen identifiziert wurden - insbesondere im Konzept- und Entwurfsstadium - sind auch Bestandteil nahezu aller untersuchter Modelle beider Disziplinen [vgl. GERICKE12, S. 176].
- Werden innerhalb einer Disziplin alle in den Vorgehensmodellen beinhalteten Phasen gesammelt betrachtet, wird jede Phase zumindest einmal von einem Vorgehensmodell der jeweiligen Disziplin adressiert.

Der Vergleich der untersuchten Vorgehensmodelle deutet folglich auf grundlegende Gemeinsamkeiten der Vorgehensweisen im Maschinenbau und der Architektur hin [vgl. GERICKE12, S. 176]. Aus der Gegenüberstellung [EISENBART11, S. 5] bzw. weiterer Untersuchung [GERICKE12, S. 176 f.] ist jedoch zu entnehmen, dass die überwiegende Anzahl an Modellen im Maschinenbau, aber nur ein Teil der Modelle der Architektur, das Klären von Anforderungen bzw. die Bedarfsanalyse als Kernbestandteil vorsehen. Dagegen beschreiben Modelle der Architektur durch die Berücksichtigung der Phasen der Errichtung und Nutzung tendenziell einen längeren Zeitraum des Lebenszyklus, da im Maschinenbau die Mehrzahl der Modelle nach der Ausarbeitungsphase enden [GERICKE12, S. 177 ff.].

2.5 Grundlagen zur Prozessentwicklung

Im Allgemeinen lassen sich Prozesse bzw. Vorgehensweisen auf unterschiedliche Weise beschreiben [BENDER16, S. 406]. In der Literatur werden Vorgehensmodelle umfassend diskutiert und klassifiziert [WYNN05; GERICKE11; BENDER16]. Als Grundlage für die Entwicklung der methodischen Unterstützung bzw. des Planungsprozesses werden Be-

standteile von Vorgehensmodellen bzw. Prozessen, mögliche Kriterien zur Klassifikation, Integrationsformen sowie die Modellierung aufgegriffen.

2.5.1 Vorgehensmodelle basierend auf Phasen und Aktivitäten

Zu den Grundbausteinen eines Prozessmodells zählen Aktivitäten und Phasen [BENDER16, S. 406]. Der Prozess wird durch Aktivitäten in einzelne Bestandteile unterteilt, wobei Phasen logisch zusammenhängende Aktivitäten gruppieren. Die spezifische Abfolge von Aktivitäten sowie Phasen stellt die Vorgehensstrategie dar [BENDER16, S. 406]. Blessing [BLESSING94, S. 93 ff.] stellt vier, in Bild 2.15 abgebildete typische Strategien in Prozessmodellen vor. Diese Strategien sind schrittweise seriell, zyklisch, phasenweise wiederholend bzw. phasenweise konkretisierend. Typischerweise als Flussdiagramm dargestellt, lassen sich die Reihenfolge der Aktivitäten bzw. Phasen sowie deren Abhängigkeiten festhalten [BENDER16, S. 406].

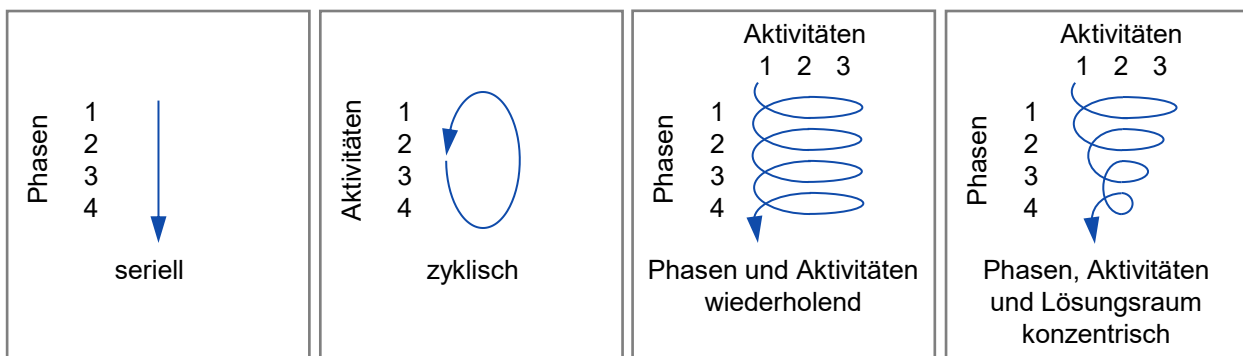


Bild 2.15: Unterscheidung von Vorgehensstrategien nach Blessing [BLESSING94, S. 93 ff.]

2.5.2 Klassifizierung von Prozessmodellen

Nachfolgend werden abschnittsweise anhand von Kurzdefinitionen Kriterien zur Klassifikation von Prozessmodellen erläutert. Bei der Gestaltung von Prozessen ist eine abschnittsübergreifende Kombination der Kriterien möglich [BENDER16, S. 406].

Phasenbasierte Modelle gliedern einen Prozess in Phasen [WYNN05, S. 37], wie z. B. Problemdefinition, Konzeption, Entwurf [GERICKE11, S. 3], für eine schrittweise Detaillierung der Lösung. Aktivitätenbasierte Modelle beschreiben einen Prozess mittels wiederkehrender Aktivitäten [BENDER16, S. 407]. Beispielhafte Aktivitäten sind z. B. Lösungsgenerierung, Bewertung und Auswahl [GERICKE11, S. 03]. Kombinierte Modelle sehen eine Gliederung eines Prozesses in Phasen vor und beschreiben innerhalb jeder Phase die zugehörigen Aktivitäten [BENDER16, S. 407].

Bei lösungsorientierten Modellen wird aufbauend auf eine anfängliche Lösung diese unter Berücksichtigung des Gestaltungsraums und der Anforderungen iterativ analysiert und weiterentwickelt [WYNN05, S. 36]. Der Schwerpunkt bei problemorientierten Modellen liegt auf einer Abstraktion und gründlichen Analyse des vorliegenden Problems, bevor eine Reihe von Lösungsvarianten entwickelt wird [WYNN05, S. 36].

Daneben werden in der Praxis anzutreffende und etablierte Vorgehensweisen durch deskriptive Modelle beschrieben, während ein in der Praxis beobachtetes und hinsichtlich der Effizienz und Effektivität verbessertes bzw. idealisiertes Vorgehen als präskriptives Modell bezeichnet wird [BENDER16, S. 407].

2.5.3 Ablauforganisatorische Integration von Aktivitäten

Ein Erfolgskriterium für die Produktentwicklung bildet die ablauforganisatorische Integration, die alle erforderlichen Aktivitäten in eine zeitlich-logische Abfolge stellt [BENDER16, S. 404]. Unterschieden werden in der Produktentwicklung drei Ansätze (vgl. [VDI 2221-1 2019, S. 14]), die Bild 2.16 veranschaulicht.

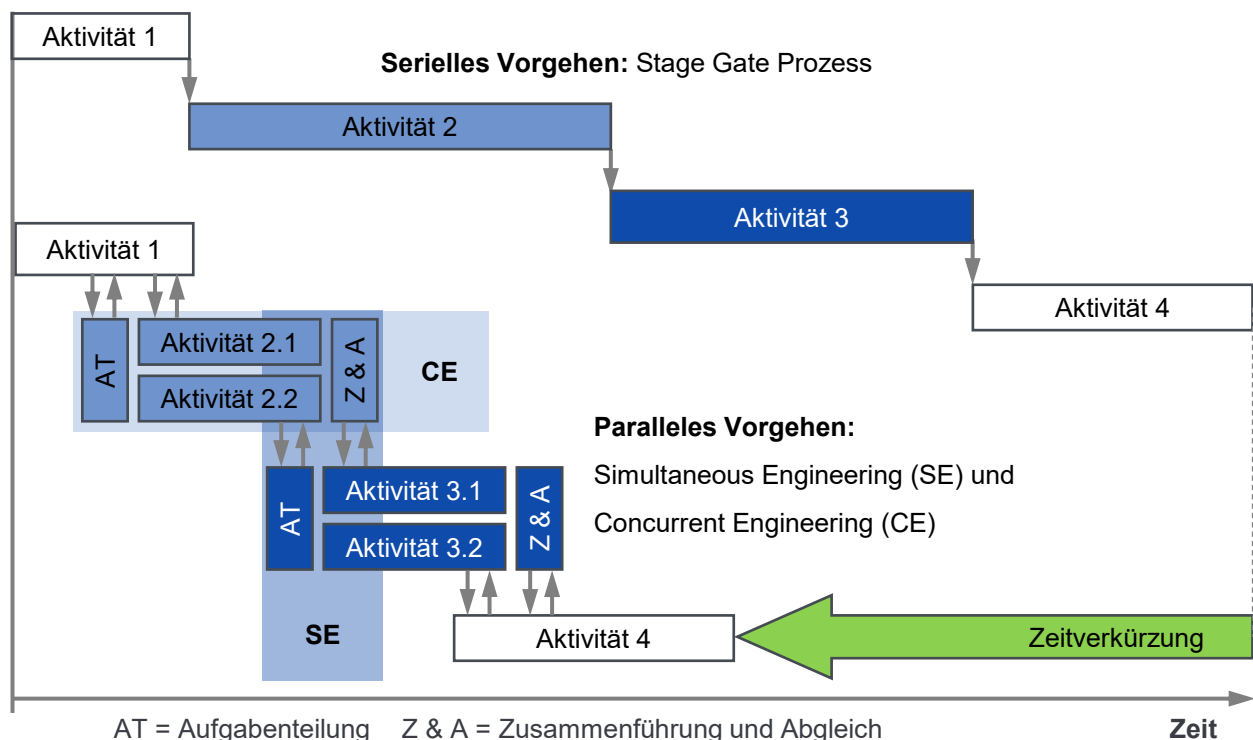


Bild 2.16: Möglichkeiten der parallelen Bearbeitung in Anlehnung an [NEUTSCHEL14, S. 351]

Werden einzelne Arbeitsschritte bzw. Phasen nacheinander bearbeitet und dabei ein nachfolgender Schritt erst nach vollständigem Abschluss des vorherigen begonnen, wird dieses Vorgehen als serielle Bearbeitung [NEUTSCHEL14, S. 350] bzw. Stage-Gate-

Prozess [BENDER16, S. 404] bezeichnet. Meilensteine, deren Erreichen die Erfüllung vorab definierter Kriterien bedingt, trennen die Aktivitäten bzw. Phasen und bestimmen den Übertritt in jeweils nachfolgende Schritte [BENDER16, S. 404]. Die serielle Bearbeitung ermöglicht zwar eine abgeschlossene Basis für nachfolgende Phasen, eine Optimierung der Gesamtlaufzeit durch die Parallelisierung von Aufgaben streben jedoch zwei nachfolgend beschriebene Ansätze an.

Das Simultaneous Engineering beschreibt das überlappte und parallele Ausführen unterschiedlicher und ursprünglich einander folgender Aktivitäten. Das Concurrent Engineering sieht das Aufteilen einer Aufgabe auf mehrere Personen vor, sodass eine parallele Bearbeitung ermöglicht wird. [NEUTSCHEL14, S. 351]

Neben der Reduktion der Gesamtlaufzeit erfordern sowohl die begrenzte Kapazität, die ein Einzelner für ein Projekt aufbringen kann, als auch die Spezialisierung der Beteiligten eine Parallelisierung von Prozessen [vgl. SPATH16, S. 4]. Die parallele Bearbeitung von Aufgaben bedingt eine klare Definition von Schnittstellen, sodass am Ende der Bearbeitung die Ergebnisse eine Zusammenführung und ein Abgleich zulassen [NEUTSCHEL14, S. 351].

2.5.4 Ansätze zur Modellierung von Prozessen

Prozesse lassen sich auf vielfältige Weise modellieren und es existieren dazu zahlreiche Ansätze, zu denen beispielsweise Flussdiagramme bzw. die Netzplantechnik, Gantt-Diagramme sowie Design Structure Matrizen zählen [BENDER16, S. 406]. Die VDI-Richtlinie 2221 [VDI 2221-1 2019, S. 16] stellt unterschiedliche Darstellungsarten von Abläufen in Bezug auf den Detaillierungs- und Formalisierungsgrad gegenüber (vgl. Anhang A.3).

Entsprechend des Detaillierungsgrads unterscheiden sich die Darstellungsarten hinsichtlich des Informationsgehalts. Gericke et al. [GERICKE11, S. 10] weisen darauf hin, dass die Festlegung auf einen Abstraktionsgrad eine Gratwanderung darstellt. Wird dieser zu hoch gewählt, deckt das Modell ein breites Anwendungsspektrum ab, welches jedoch aufgrund der fehlenden kontextspezifischen Unterstützung nur begrenzt Anwendung findet. Ein geringer Abstraktionsgrad bewirkt, dass nur eine eingeschränkte Zielgruppe das Modell für einen spezifischen Zweck nutzen kann. Beispielhafte Informationen eines Prozessmodells sind nach Bender und Gericke [BENDER16, S. 406]:

- Verantwortlichkeit (Personen, Rollen, Abteilungen)
- Umfang von Aktivitäten (Dauer, benötigte Ressourcen)
- Abhängigkeiten zwischen Aktivitäten

- Termine
- Arbeitsfortschritt
- Arbeitsergebnisse (Attribute der Ergebnisse, Dokumente etc.)
- Vertrauensniveau in Vorhersagen zu Dauer, Kosten etc. von Einzelaktivitäten.

Auf Angaben wie die tatsächliche Dauer bzw. Aufwände von Aktivitäten oder Iterationen wird in Prozessmodellen in der Regel verzichtet, da diese stark durch den Anwendungsfall geprägt sind. Im Vergleich zur Realität geben die Modelle außerdem die Abläufe in einer idealisierten und teilweise sequenziell wirkenden Form wieder, um im gewählten Abstraktionsgrad den zugrundeliegenden Zweck zu erfüllen. [VDI 2221-1 2019, S. 15]

2.6 Grundlagen zum Requirements Engineering

Die differenzierte Berücksichtigung von Anforderungen in allen Entwicklungsphasen stellt einen Schlüsselfaktor zur Beherrschung der Entwicklung von Systemen höherer Komplexität dar [VDI 2206 2004, S. 23]. Das Requirements Engineering umfasst als Überbegriff einen Ansatz, zu dem alle Aktivitäten im Umgang mit Anforderungen zählen [BAUMGART16, S. 426]. Anforderungen legen qualitative oder quantitative Eigenschaften wie z. B. technische Funktionen oder Merkmale eines Produkts bzw. Systems fest, die das zu entwickelnde Produkt aufweisen muss [LINDEMANN09, S. 329]. Das präzisierte Formulieren des Problems unterstützt die Lösungssuche, da sich der Kern des Problems und weitere untergeordnete Anforderungen lösungsneutral und bestenfalls weitestgehend vollständig aufzeigen lassen [VDI 2221-1 2019, S. 18]. Der Umgang mit Anforderungen endet nicht mit deren Freigabe zur Umsetzung im Produkt (nach dem „Klären der Aufgabenstellung“ bzw. der Planungsphase der Produktentwicklung), sondern setzt sich nach der initialen Erhebung durch eine fortlaufende Konkretisierung und Aktualisierung in verschiedenen Detaillierungsgraden fort [VDI 2221-1 2019, S. 17 f.]. Um Iterationen zu vermeiden, sind konzeptbestimmende Anforderungen jedoch vor dem Beginn der Konzeption zu erfassen [FELDHUSEN13C, S. 327].

Zu den typischen Aufgaben des Requirements Engineerings zählen die Identifizierung von Stakeholdern, das Verständnis der Kundenbedürfnisse und die Identifikation, Analyse und Validierung von Anforderungen [EIGNER14B, S. 17]. Der Begriff Requirements Engineering steht daher für einen kooperativen, iterativen und inkrementellen Prozess [GILZ14, S. 55], welcher den sogenannten Begleit- und Querschnittsprozessen zuzuordnen ist [JACKSTIEN14, S. 83; BENDER16, S. 403]. Der Ansatz stammt ursprünglich aus der

Softwareentwicklung [POHL08]. Für die Anwendung in der Produktentwicklung fassen u. a. Baumgart [BAUMGART16] und Gilz [GILZ14] das Themenfeld zusammen.

Nach Eisenbart et al. [EISENBART11, S. 6] stellt das Klären der Anforderungen bzw. die Produktspezifikation einen festen Bestandteil in einer großen Anzahl untersuchter Vorgehensweisen der Produktentwicklung und der Mechatronik dar. Wie in Kapitel 2.4 bereits erwähnt, ist in den analysierten Planungsmethodiken der Architektur die Anforderungsspezifikation überwiegend nicht bzw. nicht tiefgehend erläutert [EISENBART11, S. 6]. Ein Transfer des Requirements Engineering erfolgte bereits ins Bauwesen [GIRMSCHIED10A; GIRMSCHIED10B; KRÖNERT10], nachdem bis zur Veröffentlichung der genannten Publikationen kein Ansatz existierte [FERNIE03; KRÖNERT10, S. 13 und 89]. Begründet durch die zunehmende Komplexität ist heute das Requirements Engineering einschließlich zugehöriger Methoden und Werkzeuge bei der Entwicklung technischer Systeme unumgänglich [GILZ14, S. 53] und hat sich zu einer eigenen Disziplin entwickelt [EIGNER14B, S. 16 f.].

Trotz der einheitlichen Zielsetzung des Requirements Engineerings müssen für die zielführende Anwendung branchenspezifische Ansätze jeweilige Unterschiede aufweisen [KRÖNERT10, S. 70]. Mit dem Hintergrund, dass insbesondere sicherheitskritische Produkte (wie adaptive Gebäude) eine gründliche Planung, Spezifikation und Dokumentation erfordern [vgl. SCHULZE16, S. 176], werden im Folgenden in den Branchen Maschinenbau und Bauwesen bekannte Aktivitäten, Methoden und Hilfsmittel vorgestellt. Für eine tiefergehende Erläuterung des Requirements Engineering wird auf die einschlägige Literatur [VERSTEEGEN04; POHL08; EBERT12; RUPP14] verwiesen.

2.6.1 Requirements Engineering in der Produktentwicklung

Neben der einheitlich verstandenen, allgemeinen Zielsetzung des Requirements Engineerings sind die untergeordneten Kernprozesse und jeweilige Aktivitäten in verschiedenen Branchen und Literaturquellen unterschiedlich bezeichnet. Diese Arbeit lehnt sich aufgrund des Blickwinkels der Produktentwicklung an die Begrifflichkeiten nach Baumgart [BAUMGART16, S. 425] an. In den folgenden Unterkapiteln werden zunächst die Aktivitäten erläutert und anschließend jeweils unterstützende Methoden bzw. Hilfsmittel vorgestellt.

2.6.1.1 Aktivitäten des Requirements Engineerings

Das Requirements Engineering besteht aus zwei Kernprozessen, die als Aufgabenklärung bzw. Anforderungsmanagement bezeichnet werden [BAUMGART16, S. 426; EHRLEN-

SPIEL17, S. 495]. Bild 2.17 veranschaulicht beide Kernprozesse und die jeweils untergeordneten Aktivitäten. Zur Aufgabenklärung zählen das Erheben, Analysieren und Dokumentieren von Anforderungen [BAUMGART16, S. 426]. Das Ergebnis stellt die Anforderungsspezifikation dar, die beispielsweise in Dokumentenform einer Anforderungsliste [FELDHUSEN13C, S. 321 ff.] entspricht. Bei den Anforderungen wird in Basis- (Erfüllung wird von Kunden als selbstverständlich vorausgesetzt), Leistungs- (Kundenzufriedenheit steigt mit höherem Erfüllungsgrad) sowie Wunschanforderungen (Erfüllung weckt Begeisterung) unterschieden [BAUMGART16, S. 439]. Die Aktivitäten der Aufgabenklärung können nach der ersten Dokumentation der Anforderungen nicht als abgeschlossen angesehen werden, da während nachfolgenden Entwicklungsphasen Ergänzungen durch fortschreitenden Erkenntnisgewinn entstehen [BAUMGART16, S. 427].

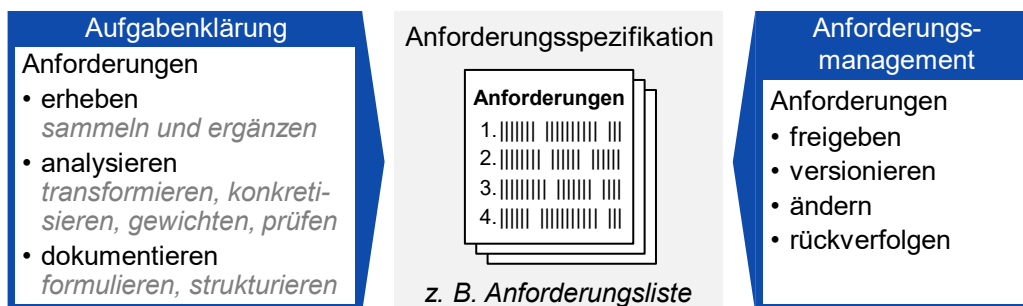


Bild 2.17: Kernprozesse und deren Aktivitäten im Requirements Engineering, in Anlehnung an Baumgart [BAUMGART16, S. 425 ff.]

Die Aktivitäten des Anforderungsmanagements beginnen mit dem Vorliegen der ersten Version der Anforderungsspezifikation. Dieser zweite Kernprozess erstreckt sich bis zum Abschluss des Entwicklungsauftrags und berücksichtigt das Freigeben, Versionieren, Ändern und Rückverfolgen von Anforderungen [BAUMGART16, S. 426].

Eine gründliche Ermittlung der Anforderungen führt zwar zu höheren Aufwänden in frühen Phasen, ermöglicht im Vergleich jedoch deutlich niedrige Mehrkosten durch die Minimierung von Iterationen im Fall von Änderungen in späten Phasen [FELDHUSEN13C, S. 329]. Im Kontext des Requirements Engineering sind in der Praxis branchenübergreifend Risiken für eine erfolgreiche Projektumsetzung zu berücksichtigen. Darunter fallen fehlende, falsche sowie sich ändernde Anforderungen [EBERT12, S. 5 ff.].

2.6.1.2 Methoden und Werkzeuge des Requirements Engineering

Zur Unterstützung der Aufgabenklärung sind in der Literatur diverse Methoden und Werkzeuge den vorgestellten Aktivitäten zugeordnet. Tabelle 2.2 fasst das jeweilige Ziel und

die zur Anwendung empfohlenen Methoden bzw. Werkzeuge auf Grundlage von Baumgart [BAUMGART16, S. 425 ff.] zusammen.

Eine weitere Grundlage für Ergebnisse dieser Arbeit stellt die „Leitlinie mit Hauptmerkmalen“ nach Pahl und Beitz [Feldhusen13c, S. 331] dar. Mit Hilfe einer Liste von Schlagworten gebräuchlicher Anforderungen soll durch Assoziation die vollständige Identifikation von Anforderungen an allgemeine Produkte unterstützt werden [Feldhusen13c, S. 330]. Darüber hinaus dienen die Hauptmerkmale bei der Dokumentation der Anforderungen auch zur thematischen Strukturierung der Anforderungsspezifikation [Baumgart16, S. 444]. Die Hauptmerkmalliste ist in Anhang A.4 festgehalten.

Aktivität		Ziel	Methoden/Hilfsmittel
Anforderungen erheben	<i>sammeln</i>	Zusammentragen vorhandener Anforderungen (aus Auftrag, Unternehmensstrategie, Marktanalyse, Normen, ...)	Analyse der Vorgänger- und Wettbewerbsprodukte
	<i>ergänzen</i>	Vervollständigen der Anforderungen durch systematisches Absuchen	Hauptmerkmale, Funktions- und Lebenszyklusanalyse
Anforderungen analysieren	<i>transformieren</i>	Eindeutige, lösungsneutrale und prüfbare Formulierung der Anforderungen	QFD-Matrix / House of Quality
	<i>konkretisieren</i>	Klassifizieren mit Attributen (Forderung/Wunsch) und Quantifizierung sowie Identifizieren von Unklarheiten	Attribute
	<i>gewichten</i>	Grundlage für Bewertung und Selektion von Lösungsalternativen sowie zur Vermeidung von Fehlentwicklungen	Paarweiser Vergleich, Nutzwertanalyse
	<i>prüfen</i>	Inhaltliche und formelle Kontrolle der Anforderungen	Reviewprozesse
Anforderungen dokumentieren	<i>formulieren</i>	Formulieren korrekter und eindeutiger Anforderungen	Qualitätskriterien
	<i>strukturieren</i>	Sicherstellen einer übersichtlichen Darstellung	Hauptmerkmale

Tabelle 2.2: Ziele und unterstützende Methoden im Kernprozess Aufgabenklärung, vgl. Baumgart [BAUMGART16, S. 425 ff.] bzw. Honold et al. [HONOLD17B, S. 5]

Neben Anforderungslisten in tabellarischer Dokumentenform erfolgt die Dokumentation der Anforderungsspezifikation je nach Projektumfang auch mit speziellen datenbankbasierten Softwaretools [FELDHUSEN13C, S. 331], die die Aktivitäten des Anforderungsmanagements unterstützen [VDI 2221-1 2019, S. 18; VDI 2206 2004, S. 59].

2.6.2 Requirements Engineering in der Bauplanung

Bedürfnisse, Ziele und Anforderungen von Bauherren, Nutzern und Betreibern eines Gebäudes sollten in der sogenannten Bedarfsplanung in einem möglichst frühen Zeitpunkt der Planung zusammengestellt werden [DIN 18205 2016, S. 4]. Trotz teilweiser verheerender Auswirkungen auf Kosten und Renditen werden bei Bauprojekten Ziele und

Anforderungen in unterschiedlichen Projektphasen immer wieder geändert [GIRMSCHIED10A, S. 197]. Studien zeigen, dass sich das Requirements Engineering im Vergleich zu den bereits genannten Branchen kaum durchgesetzt hat [FERNIE03; YU10] bzw. nicht stattfindet und kein strukturiertes Vorgehen zur Erfassung und Verarbeitung der Anforderungen existiert [KRÖNERT10, S. 96]. Für die Durchführung der Planung benötigte Erkenntnisse basieren auf der persönlichen Einschätzung der Beteiligten [Krönert10, S. 96]. Mit dem Ziel einer frühzeitigen und gezielten Ermittlung sowie Umsetzung von Anforderungen wurde von Girmscheid und Krönert das Anforderungs-Engineering-Prozessmodell vorgestellt [GIRMSCHIED10A; GIRMSCHIED10B; KRÖNERT10]. Das Modell dient dazu, Bauprojekte schneller, zielorientierter und mit geringeren Nachträgen umzusetzen [GIRMSCHIED10A, S. 197]. Im Wesentlichen sieht das Vorgehen zunächst die Ermittlung der Ziele und davon abgeleitete Anforderungen sowie nachfolgend einen Controlling-Prozess zur Zielerreichung und Zielsteuerung des Projekts vor [GIRMSCHIED10B, S. 208].

Für die systematische Bedarfsplanung stellt die DIN 18205 [DIN 18205 2016] für die darin definierten Prozessschritte „Projektkontext klären“, „Projektziele aufstellen“, „Informationen erfassen und auswerten“, „Bedarfsplan erstellen“, „Bedarfsdeckung untersuchen“ sowie „Bedarfsplan und Lösungen abgleichen“ jeweils eine Checkliste bereit, die anhand von Kriterien eine möglichst vollständige Durchführung unterstützen soll. Die Neufassung der DIN enthält im Vergleich zur Fassung von 1996 [DIN 18205 1996] weniger Anforderungen an den Entwurf, ordnet die Kriterien jedoch den jeweils zugehörigen Prozessschritten zu. Die Checklisten können vom grundlegenden methodischen Ansatz mit den Hauptmerkmalen nach Pahl und Beitz [FELDHUSEN13C, S. 331] verglichen werden. Eine kategorische Einteilung von Anforderungen nehmen Kamara et al. [KAMARA02, S. 07] vor. Demnach lassen sich Anforderungen in Kunden-, Baufeld-, Umwelt-, Gestaltungs- und Ausführungsanforderungen sowie regulative Anforderungen gliedern [KAMARA02, S. 07]. Trotz der erheblichen Bedeutung der Bedarfsplanung (nach DIN 18205) wird diese von Auftragnehmern und Auftraggebern „konsequent ignoriert“ [KALTE06, S. 54]. Diskussionen mit am Forschungsprojekt beteiligten Architektinnen und Architekten ergaben, dass die Checklisten weitestgehend unbekannt sind und nicht zur Anwendung kommen. Gründe dafür sind, dass die gesamte Bedarfsplanung nur eine zusätzliche Leistung nach HOAI darstellt [HOAI13] und, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, nur wenige Prozesse der Architektur auf die Anforderungsdefinition fokussieren [EISENBART11, S. 6].

2.7 Bewertung der Umweltwirkungen von Produktlebenszyklen

Die umfassende Analyse eines Produkts, Prozesses oder einer Dienstleistung im Verlauf des jeweiligen Lebenszyklus hinsichtlich der Umweltwirkungen ist das Ziel des Life Cycle Assessments (LCA) [NIEMANN09, S. 307]. Das Vorgehen der synonym bezeichneten Ökobilanzierung basiert im Wesentlichen auf der Ermittlung und Bewertung von Eingangs- und Ausgangsgrößen (des Inputs und Outputs) von Stoff- und Energieströmen und ist durch Normen [DIN EN ISO 14040 2009; DIN EN ISO 14044 2021] standardisiert. Als Ergebnis der Untersuchung werden die identifizierten Umweltwirkungen gruppiert in Wirkungskategorien dargestellt und lassen sich für die Identifikation von sogenannten „ökologischen Hotspots“ sowie den Vergleich von Produktvarianten nutzen.

Die DIN EN 15804 grenzt zur differenzierten Bewertung von Gebäuden bzw. Bauleistungen deren Lebenszyklus in die Herstellungs-, Errichtungs-, Nutzungs- sowie Entsorgungsphase ab und definiert sogenannte grundlegende Produktkategorien zur Unterstützung einer vollständigen Betrachtung [DIN EN 15804 2014, S. 6]. Durch die Erläuterung und in Bild 2.18 dargestellte Unterordnung von Prozessbestandteilen, wie am Beispiel der Herstellungsphase die Rohstoffbereitstellung, der Transport und die eigentliche (Komponenten-)Herstellung, lassen sich diese definierten Phasen einheitlich zuordnen.

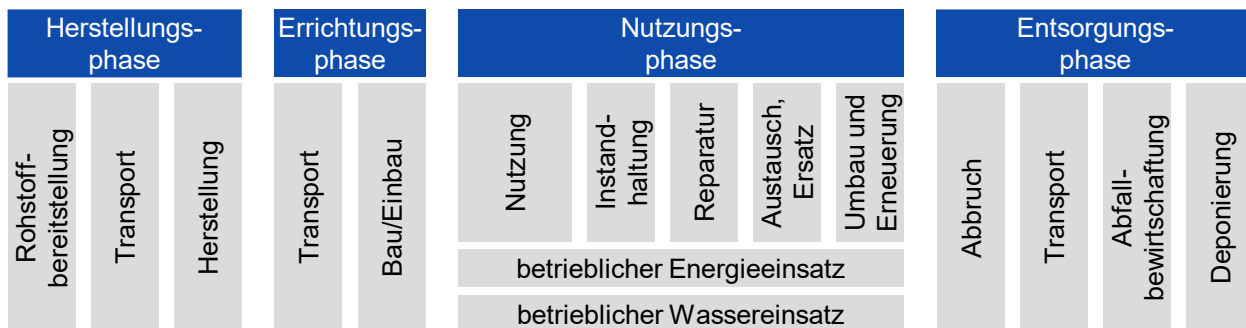


Bild 2.18: Einflüsse aus dem Lebenszyklus auf die Planungsphase, in Anlehnung an DIN EN 15804 [DIN EN 15804 2014, S. 14]

Bereits existierende Ansätze zur Integration der Ökobilanzierung von Gebäuden in den Planungsprozess fassen Schlegl et al. [SCHLEGL19A, S. 6 f.] auf Grundlage einer Literaturrecherche zusammen. Daneben werden Herausforderungen bei der Bilanzierung von Gebäuden vorgestellt. Insbesondere verändernde Nutzungsszenarien sowie eine üblicherweise zunächst unbekannte Nutzungsdauer eines Gebäudes führen zu einem hohen Maß an Unsicherheit im Ergebnis [VERBEECK10, S. 1037] und die individuelle Planung bzw. Ausführung eines Gebäudes erfordert eine individuelle Bilanzierung [CABEZA14, S. 407].

2.8 Sicherheit und Zuverlässigkeit bei technischen Systemen und im Ingenieurbau

Zu den wichtigsten Eigenschaften baulicher Anlagen zählen die Zuverlässigkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit und Gebrauchstauglichkeit, an die jeweils hohe Anforderungen gestellt sind [RACKWITZ12, S. 337]. Die Begriffe werden für ein einheitliches Verständnis kurz erläutert. Anschließend folgt die Vorstellung von Maßnahmen, wie die Gewährleistung der Sicherheit und Zuverlässigkeit als Bestandteil der Entwicklung der adaptiven Systeme Berücksichtigung finden können.

2.8.1 Begriffsdefinitionen von Eigenschaften baulicher Anlagen

Der Begriff Zuverlässigkeit steht für die Wahrscheinlichkeit, dass ein technisches Produkt(-system) unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen innerhalb einer festgelegten Zeitspanne nicht ausfällt [BERTSCHE16, S. 185]. Unter dem Begriff „sicher“ wird nach Neudörfer [NEUDÖRFER13, S. 505] das zuverlässige Erfüllen technischer Funktionen verstanden, wobei im Wesentlichen damit gemeint ist, dass als Folge keine Gefahren für Mensch und Umwelt entstehen. Das Risiko im Umgang mit dem System ist demnach durch die Häufigkeit als auch das Ausmaß eines Schadens beschrieben.

Im Bauwesen wird nach Rackwitz und Zilch [RACKWITZ12, S. 337] die Verfügbarkeit als Eigenschaft verstanden, „bei Gebrauch in nutzungsfähigem Zustand zu sein“, welche beispielsweise wegen Wartungs- und Inspektionsarbeiten sowie „den uneingeschränkten Gebrauch verhindernder Systemzustände (z. B. zu starke Schwingungen)“ nicht gegeben sein kann. Die Gebrauchstauglichkeit beschreibt die Eigenschaft eines Bauwerks, „die uneingeschränkte Nutzung für den vorgesehenen Zweck zu gewährleisten“. Die an die vorgestellten Eigenschaften gestellten hohen Anforderungen sind durch bauaufsichtlich eingeführte Regelwerke wie z. B. Normen wie dem Eurocode [DIN EN 1990 2010] zur Bemessung von Tragwerken bzw. deren Bauteile festgehalten. [RACKWITZ12, S. 337]

2.8.2 Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit und Zuverlässigkeit als Planungsbestandteil

Die Zuverlässigkeit und Sicherheit hängen zwar von zahlreichen Einflussfaktoren ab [BERTSCHE04, S. 3], bereits bei der Entwicklung (bzw. Planung adaptiver Systeme) werden jedoch Produkteigenschaften festgelegt als auch Betriebseinflüsse ermittelt [BERTSCHE16, S. 194]. Entsprechend können präventiv Maßnahmen zur frühzeitigen Fehlererkennung bzw. Instandhaltung als auch zu einem kontrollierten Verhalten in Fehlerfällen

getroffen werden. Darüber hinaus kategorisieren im Kontext des Bauwesens Rackwitz und Zilch [RACKWITZ12, S. 337] Maßnahmen zur Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Sicherheit, zu denen auch die Überprüfung des Tragwerksentwurfs und der Bemessung (im Rahmen der Genehmigungsplanung) gehören. Um systematisch potenzielle Fehlerfälle frühzeitig aufzudecken und Maßnahmen zu ergreifen, existieren in der Produktentwicklung zahlreiche Methoden wie die Fehlerbaumanalyse [BERTSCHE04, S. 160 ff.] oder die Fehler-Möglichkeiten-Einfluss-Analyse (FMEA) [BERTSCHE04, S. 106 ff.]. Beide wurden bereits im Kontext adaptiver Systeme erprobt und deren Potenzial bestätigt [SOBEK16C, SOBEK16D].

Für ein kontrolliertes Verhalten in Fehlerfällen dienen das Fail-Safe-Prinzip, welchem zugrunde liegt, dass auch beim Eintreten eines bekannten Fehlerfalls eines Bauteils sich das Gesamtsystem in einem sicheren Zustand befindet, als auch das Prinzip der Redundanz, bei dem im Fehlerfall eine Funktion gezielt durch andere Systemkomponenten übernommen wird [BERTSCHE16, S. 201].

Die vorangegangenen Abschnitte stellten die Grundlagen überwiegend disziplinspezifisch vor. Als Abschluss dieses Kapitels folgen bestehende Erkenntnisse bzw. bekannte Defizite aus der Praxis, die weitestgehend von der zu entwickelnden, disziplinenübergreifenden methodischen Unterstützung aufzugreifen sind.

2.9 Studie zum Methodentransfer für die Hochbauplanung

In der Literatur beschriebene, konkrete Anwendungen von Produktentwicklungsmethoden im Bauwesen beschränken sich auf wissenschaftliche Veröffentlichungen von Fallstudien, deren Ergebnisse eine grundsätzliche Einsetzbarkeit der Methoden zur Lösung baupraktischer Problemstellungen zeigen [ERDELL06, S. 27]. In diesem Bezug vermittelt Lindemann et al. [LINDEMANN05, S. 8 ff.] eine Übersicht als Ergebnis einer Literaturrecherche. Ein davon losgelöstes Beispiel stellt die erwähnte Untersuchung des adaptiven Schalentragswerks Stuttgart SmartShell (siehe Kapitel A.1) anhand der FMEA und Fehlerbaumanalyse [SOBEK16C; SOBEK16D] dar.

Im Forschungsprojekt BayFORREST F238 „Transfer von Methoden zur nachhaltigen Entwicklung aus dem Maschinenwesen in das Bauwesen“ wurden im Rahmen der Zusammenarbeit von wissenschaftlichen Mitarbeitern des Forschungsfelds methodische Produktentwicklung und eines Bauingenieurs [vgl. ERDELL06, S. 29 ff.] anhand konkreter baupraktischer Anwendungsbeispiele Produktentwicklungsmethoden und Planungs-

prozesse erprobt [LINDEMANN05; S. 1]. Aus der Bewertung der Fallstudien und der anknüpfenden Forschungsarbeit ging das Fazit hervor, dass sich aufgrund der Vergleichbarkeit der grundsätzlichen Zielstellungen und Teilschritte beim Problemlösen im Bauwesen und Maschinenbau „Methoden sehr gut auch in der Baupraxis einsetzen lassen“ [LINDEMANN05, S. 44 bzw. 51]. Anpassungen der übertragenen Methoden waren im Allgemeinen nur in geringem Umfang notwendig und betrafen die für eine Methodenanwendung typische Adaption an die Aufgabenstellung (Detaillierungsgrad, Randbedingungen). Anpassungsaufwand erfordern veränderte Begrifflichkeiten (z. B. bei Formblättern) sowie fachspezifische Checklisten, vorbereitete Anforderungslisten und Konstruktionskataloge [Lindemann05, S. 45]. Durch die praktische Erprobung der Methoden und durch eine Umfrage wurde identifiziert, dass eine typische Einzelarbeit bei der Problemlösung, eine fehlende Methodenkenntnis sowie ein „zu hoher Aufwand“ als wesentliche, hemmende Faktoren für Methodenanwendungen in der Bauplanung zu nennen sind [LINDEMANN05, S. 37 bzw. 44].

Als weiteres Forschungsergebnis resultierte eine Planungsprozessstabelle, die den Phasen der HOAI bzw. deren jeweiligen Zielen zugehörige Arbeitsinhalte, verantwortliche Planungsbeteiligte, passende Produktentwicklungsmethoden und resultierende Dokumente gegenüberstellt [LINDEMANN05, S. 68]. Außerdem entstand ein Einführungskonzept für transferierte Methoden im Bauwesen, das aus einer prozessualen Beschreibung des Vorgehens besteht. Im Wesentlichen werden darin nach der Identifikation von Problemen bzw. des Unterstützungsbedarfs geeignete Methoden ausgewählt, notwendige Anpassungen vorgenommen und nach einer Pilotanwendung kontinuierliche Verbesserungen empfohlen [LINDEMANN05, S. 47].

Weitere Literaturbeispiele der Kooperation beider Fachgebiete stellen die mit Produktentwicklungsmethoden unterstützte Entwicklung von Fassadenlösungen [SCHMID15] sowie die Potenzialermittlung eines gegenseitigen Wissenstransfer bezüglich der Modularisierung [WILBERG17] dar. Um die am Gebäudeentwurf beteiligten Disziplinen methodisch zu unterstützen, nutzt auch Zeiler [ZEILER19, S. 35] das problemorientierte Vorgehen der Produktentwicklung in Anlehnung an Pahl und Beitz [PAHL07]. Der Beitrag wird aufgrund der fehlenden Einbindung veranschaulichender, baupraktischer Anwendungsbeispiele und der somit fehlenden Validierung als theoretische Arbeit aufgefasst.

2.10 Literaturbasierte Herausforderungen in der Bauplanung

Im Kontext der Methodenanwendung im Bauplanungsprozess listen Lindemann et al. auf Basis einer Literaturrecherche (L) [LINDEMANN05, S. 15 ff.] sowie im Rahmen der Kooperation (K) eines Methodenexperten mit Industriepartnern der Baubranche [LINDEMANN05, S. 40 ff.] identifizierte „Schwachstellen“ auf. Diese werden um Kritikpunkte am Bauprozess aus weiteren Quellen ergänzt und nachfolgend als Herausforderungen formuliert zusammengefasst. Die Auflistung dient als Ergänzung für die in Kapitel 5.3 im Kontext der Planung des Experimentalhochhauses identifizierten Herausforderungen. Bestehende Herausforderungen in der Bauplanung sind:

- Planungsvorgehen in Anlehnung an eine Honorarordnung (HOAI) stellt einen unzureichenden bzw. unstrukturierten Planungsprozess dar (L/K)
- Koordination der Planung und Integration der Planungsergebnisse erfolgt aufgrund des arbeitsteiligen Vorgehens häufig nur nachlässig [ERDELL06, S. 58]
- Schnittstellen mit anderen Fachplanern sind unzureichend geregelt und durch hohe Informationsverluste geprägt (L/K)
- Trennung zwischen Entwurf und Ausführung hinsichtlich Verantwortung und Erfahrungswissen unterbindet die Zusammenarbeit jeweils Beteiligter (L), [ERDELL06, S. 32]
- (Folglich) fehlender Informationsrückfluss von Planungsfehlern verhindert eine Kommunikation von Optimierungspotenzialen, z. B. zum Zweck einer Kostenoptimierung, Qualitätssteigerung und Einhaltung bzw. Reduktion von Bauzeiten (L/K), [ERDELL06, S. 32]
- Aufteilung der Planung auf mehrere Planungsbüros aufgrund von Kapazitäten und erforderlicher Fachkunde begünstigt Informationsdefizite und -verluste [Erdell06, S. 57 f.]
- Inkompatibilitäten von Softwaresystemen der Planungsbeteiligten führen zu Problemen beim Datenaustausch sowie Informationsverlusten (L/K), [ERDELL06, S. 59]
- Normenflut hemmt eine innovative Bauplanung und verleitet zur Lösungsauswahl innerhalb bestehender bzw. bekannter Lösungen (L)
- Anwendungen von Methoden (vergleichbar zur Produktentwicklung) sind im Bauwesen selten, im Vergleich zur Vergangenheit unverändert und Produktentwicklungsmethoden sind weitestgehend unbekannt (L)

- Typischerweise erfolgt keine (umfassende) Definition von Zielen und Anforderungen, wodurch Potenziale hinsichtlich einer schnelleren, zielorientierteren und mit geringeren Nachträgen versehenen Projektabwicklung resultieren [GIRMSCHIED10A, S. 197].
- Zu geringe Planungstiefe (K), da kleinen bzw. mittelständischen Planungsbüros (technische) Ressourcen fehlen (L) und Planer sich auf Kenntnisse von Handwerkern verlassen [ERDELL06, S. 33]
- Unzureichende bzw. fehlende Betrachtung des Lebenszyklus - einschließlich fehlende Berücksichtigung bzw. Modellierung von Stoffflüssen (K) - unterbindet die Berücksichtigung ökologischer Auswirkungen bzw. Aspekte der Weiterverwendung bzw. Umnutzung (L/K)
- Unzureichende Berücksichtigung künftiger Szenarien der weiteren Entwicklung des Baumarkts, z. B. durch gesellschaftliche und technische Veränderungen (L)
- Unkenntnis hinsichtlich Normen, Vorschriften und Regeln der anerkannten Technik könnten mit einer zum Teil fehlenden (abgeschlossenen) Berufsausbildung von Beteiligten der Bauausführung in Verbindung stehen (L)

Außerdem sei nochmals darauf hingewiesen, dass am Ende einer Leistungsphase nicht zwangsläufig alle zu erbringende Leistungsbilder abgeschlossen sein werden, ehe mit der nachfolgenden begonnen wird. So wird häufig die Genehmigung erst vorläufig ausgestellt und während der Ausführungsplanung nach der Erfüllung von Auflagen oder einer weiteren Detaillierung erteilt. Daneben werden Teilbereiche für die Vergabe vorbereitet, vergeben oder bereits ausgeführt, während andere Teilbereiche sich im Stadium der Ausführungsplanung befinden [vgl. BERGMANN13, S. 50].

2.11 Gegenüberstellung der Branchen Bauwesen und Maschinenbau

Neben der vergleichenden Diskussion der Vorgehensweisen bei der Bauplanung bzw. der Produktentwicklung in Kapitel 2.4 lassen sich auch unterschiedliche Randbedingungen der Branchen gegenüberstellen. Als Grundlage wird dazu der von Vilasini und Neitzert vorgestellte, auf Kriterien basierende Vergleich [VILASINI12, S. S. 357] herangezogen, der in Tabelle 2.3 um weitere Kriterien von Bech [BECH14, S. 10] und Erkenntnisse ergänzt ist, die aus den vorgestellten Grundlagen entnommen sind oder aus der Projektarbeit hervorgingen.

Aspekt/Kriterium	Bauwesen (Gebäude)	Maschinenbau (Konsum-/Investitionsgüter)
Allgemeines		
Projektanstoß	Projektakquise, Wettbewerbe	Marktanalyse
Projektabwicklung *	projektorientiert, auftragsbezogen	prozessorientiert, nachfrage- bzw. auftragsbezogen
Lebenszyklus	Gebäudelebensdauer zwischen 70 und 100 Jahre	Konsumgüter ca. 2 Jahre; Investitionsgüter 5 bis 10 Jahre
Planung bzw. Entwicklung		
Zusammenarbeit (aus Sicht der Projektkoordination)	integrierend, Einbindung von Leistungen von Fachplanern, projektspezifisches Team	kollaborativ mit Fachexperten, projektübergreifende Teamzusammensetzung
Vorgehensweise	nach Leistungsphasen der Honorarordnung	nach unternehmens-/branchenspezifischen Prozessen
Fokussierung	Ausführungsplanung, geringe Honorierung früher Phasen (Ausnahme: Wettbewerbe)	Produktkonzeption, frühe Phasen bzgl. Innovation maßgeblich
Bedarfsermittlung und Anforderungsdefinition	optionale „besondere“ Leistung gemäß Honorarordnung, häufig unzureichend	etabliert; Basis für Produktkonzeption und häufig Vertragsgrundlage
Abfolge von Aktivitäten	sequentielle Ausprägung	parallelisierte Ausprägung
Planungstiefe *	gering, Erfahrungswissen von Beteiligten der Bauausführung wird vorausgesetzt	detaillierte Ausarbeitung aller Komponenten, einschließlich Herstellungs-/Montageschritte, Qualitätssicherungsmaßnahmen
Planungs- bzw. Entwicklungsergebnisse/Innovation	aufbauend auf bewährten Lösungen, geringe Anzahl an Innovationen	Innovationszwang aufgrund von Wettbewerbsdruck
Herstellung bzw. Produktion		
Herstellungsverfahren *	manuell, arbeitsintensiv	automatisiert, maschinell
Herstelleinheiten/Losgröße *	einzel und individuell (Unikat)	hoch und wiederkehrend
Herstellrate *	abhängig von vorhandenen Informationen/Ressourcen	bestimmt durch Automatisierungsgrad
Massenumsatz	hoher Baustoffumsatz [t]; kostengünstige Stoffe [€/t]	geringerer Werkstoffumsatz [kg]; tlw. hochpreisige Werkstoffe [€/kg]
Herstellqualität *	entspricht den Vorgaben laut Planung bzw. Norm, häufige Nacharbeit (HOAI Leistungsphase 9)	sichergestellt durch definierte bzw. entwickelte Prozessqualität, seltene Nacharbeit
typische Produktionsbedingungen *	Baustellen mit bedingt beeinflussbaren Umwelteinflüssen	Produktionsstätten mit definierten Produktionsbedingungen, beherrschbare Einflussgrößen
Personalbindung *	projektspezifisch	langfristig
Beziehung zu Lieferanten bzw. ausführenden Firmen *	dynamisch, komplex, Vergabe von Unteraufträgen; Vorgaben durch Vergabeordnung	geregelt, wiederholend, gewachsene Zuliefererbeziehungen, Verhandlungsfähigkeit gegeben
typischer Toleranzbereich für Längenmaße	± 12-30 mm (nach DIN 18202 für Hochbau im Rohbau)	± 0,05-8 mm (nach ISO 2768)

Tabelle 2.3: Gegenüberstellung der Branchen Bauwesen und Maschinenbau, basierend (*) auf Vilasini et al. [VILASINI12, S. 357], ergänzt um weitere Kriterien

Zu berücksichtigen ist, dass der Vergleich beider Branchen auf Grundlage der Fokussierung auf Gebäude im Bauwesen sowie Konsum- bzw. Investitionsgüter im Maschinenbau vorgenommen wird und von „typischen“ Charakteristiken auszugehen ist, sodass Abweichungen wie z. B. im Kontext der Fertigteile- bzw. Fertighausbranche unberücksichtigt bleiben. Wird der Anlagen- bzw. Sondermaschinenbau in den Vergleich miteinbezogen, stellen deren Randbedingungen hinsichtlich vieler Kriterien einen fließenden Übergang der Branchen dar.

3 Stand der Forschung bzw. Technik adaptiver Gebäude

Dieses zweite Grundlagenkapitel widmet sich dem Forschungsstand adaptiver Gebäude und stellt zunächst dessen Potenzial anhand einer gesamtenergetischen Bilanz vergleichend zur konventionellen Bauweise vor. Anschließend werden ein bestehender „Designprozess“ für adaptive Systeme erläutert und adaptive Systeme mittels Definitionen klassifiziert. Der letzte Bestandteil erweitert das funktionale Verständnis anhand ausgewählter adaptiver Systeme in Form eines Beispiel- bzw. Konstruktionskatalogs. Da diese Beispiele bautechnisch umgesetzt wurden, entsprechen diese auch dem Stand der Technik.

3.1 Energetische Bilanz adaptiver Gebäude

Das Ziel, durch adaptive Systeme die Umweltwirkung von Gebäuden über den gesamten Lebenszyklus zu vermindern, lässt sich gemessen an der Emission grafisch veranschaulichen [SENATORE18, S. 4]. Als schematische, qualitative Darstellung stellt Bild 3.1 die akkumulierte Emissionen aus der Summe der grauen Energie und der Betriebsenergie dar. Das Optimum dieser Summe (Tiefpunkt der Kurve „Summe Emissionen“) zeichnet sich bei adaptiven Gebäuden durch die im Vergleich zu passiven Gebäuden verminderte graue Energie zuzüglich einer möglichst geringfügigen Betriebsenergie aus. Steifere Konstruktionen mit einem höheren Betrag an gebundener grauer Energie oder aktive Systeme mit einer unnützen Erhöhung der Zahl der Aktoren führen zu einer Zunahme der Bewertungsgröße. Aufgrund verbesserter Prozesse bei der Energiegewinnung und der die Emissionsbilanz begünstigenden Veränderung des Energiemix ist mit der zeitlichen Entwicklung eine Verringerung der Emissionen zu erwarten.

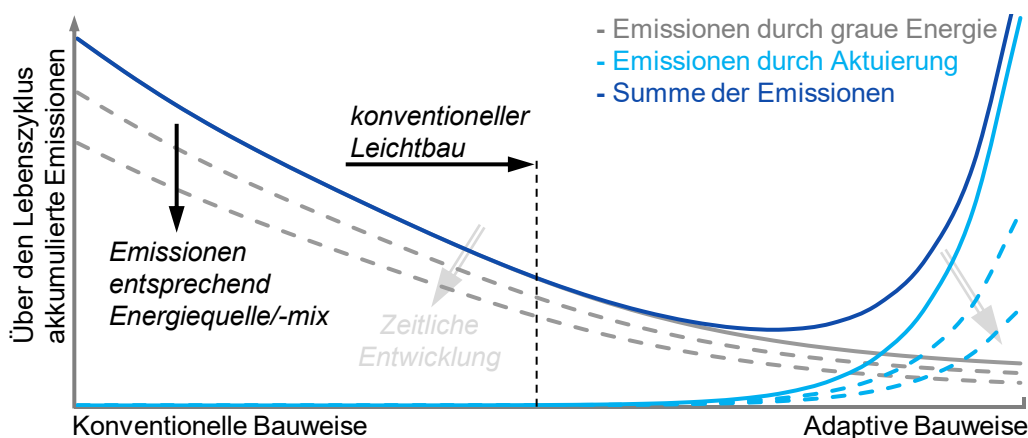


Bild 3.1: Schematische, gesamtenergetische Bilanz nachhaltiger, adaptiver Tragwerkssysteme, aufbauend auf Senatore et al. [SENATORE18, S. 4] und Weidner et al. [WEIDNER19, S. 2]

3.2 Designprozess für adaptive Systeme nach Senatore

Zur Auslegung adaptiver Systeme stellen Senatore et al. [SENATORE19] eine Strategie vor, die aus drei verschachtelten Prozessteilen besteht und mit den jeweiligen Prozessschritten Inhalt von Bild 3.2 ist. Der erste Prozessteil bezweckt die Optimierung des Systems hinsichtlich der eingesetzten grauen Energie, der zweite dient der Optimierung der Betriebsenergie und der dritte strebt als übergeordneter Prozess die Optimierung der Energiebilanz des gesamten Lebenszyklus an, wofür auch Iterationsschleifen angedacht sind. Bestandteil des Prozesses ist die Bewertung bzw. Optimierung der Materialausnutzung, die Senatore et al. [SENATORE19, S. 853] als „Material Utilisation“ bezeichnen. Der Prozess beinhaltet folglich die Auslegung des adaptiven Systems einschließlich der Akteurplatzierung, berücksichtigt jedoch nicht die Integration des Vorgehens in einen Bauprozess sowie eine Abgrenzung von Aufgabenfeldern der Architektur bzw. darüber hinaus erforderlicher, interdisziplinärer Kompetenzen.

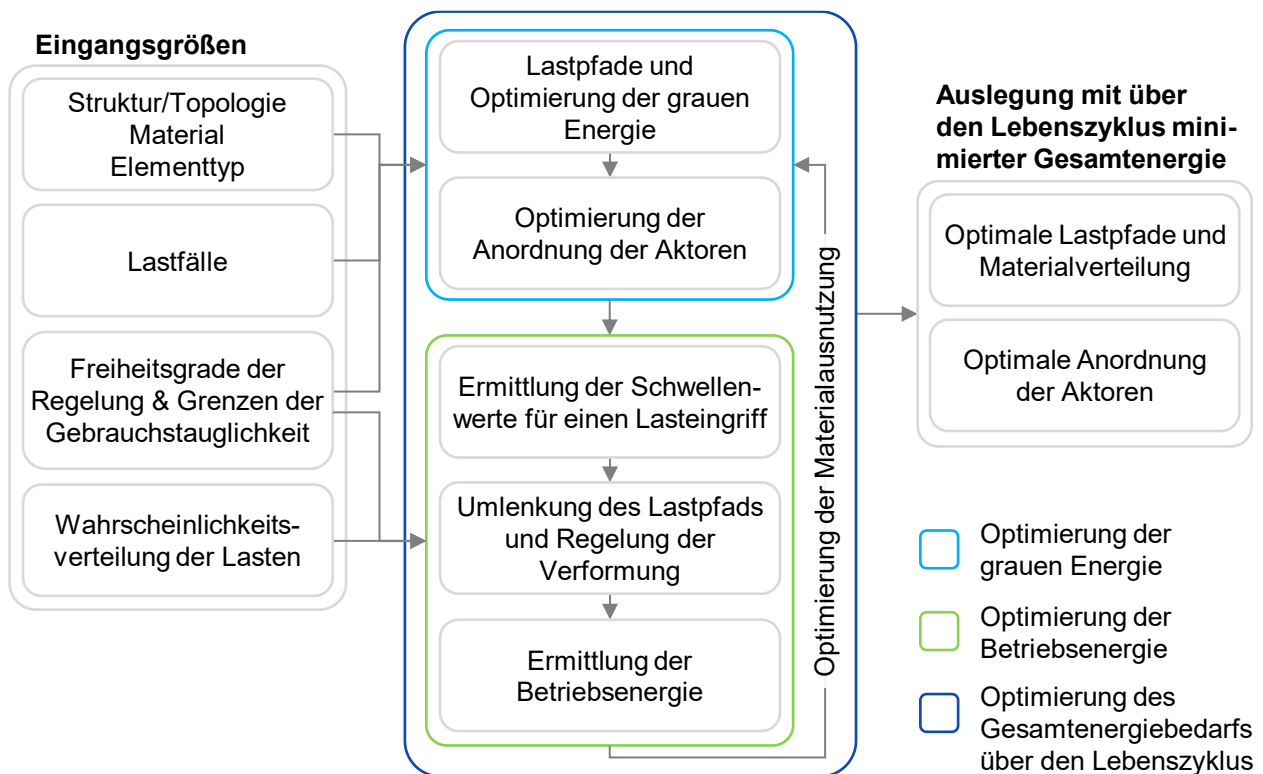


Bild 3.2: Strategie zur Auslegung adaptiver Systeme nach Senatore et al. [SENATORE19, S. 853]

Die Adaptivität der Gebäude wird mittels darin integrierter adaptiver Elemente realisiert. Im weiteren Fokus dieses Kapitels liegen daher adaptive Systeme, die als adaptive Bauelemente vorgestellt werden.

3.3 Abgrenzung adaptiver Systeme

Um die prinzipiell vielseitig realisierbare Adaptivität von Gebäuden einzuordnen, werden in Anlehnung an die Definitionen von Housner et al. [HOUSNER97] adaptive Systeme abgegrenzt. Für detailliertere Erläuterungen wird auch auf Teuffel [TEUFFEL04, S. 16 ff.] verwiesen. Unterscheiden lassen sich passive, aktive, semi-aktive sowie hybride Systeme [HOUSNER97; S. 899; vgl. auch TEUFFEL04, S. 16 ff.]:

Passive Systeme benötigen keine externe Energiezufuhr. Die durch das System hervorgerufenen Reaktionen werden durch die Tragwerksbewegungen verursacht. Als Beispiele zählen Schwingungstilger und -dämpfer sowie sich durch die Windströmung ausrichtende Strukturen.

Aktive Systeme benötigen Sensoren zur Detektion externer Einflüsse, eine Steuerung und Regelung, um ein definiertes Systemverhalten zu ermitteln, Aktoren, um die vorgegebenen Reaktionskräfte bzw. Stellwege zu realisieren sowie für den Betrieb dieser Komponenten notwendige externe Energiezuführung. Beispiele folgen in Abschnitt 3.4.

Semi-Aktive Systeme sind durch die Fähigkeit gekennzeichnet, sich trotz hoher Leistungsfähigkeit Systemeigenschaften wie die Steifigkeit oder die Dämpfung ohne leistungsstarke externe Energiequellen anpassen zu können. Dämpfer mit regelbarem elektro- oder magnetorheologischem Fluid stellen Beispiele dar.

Hybride Systeme beruhen auf der Kombination von passiven, aktiven bzw. semi-aktiven Systemen.

Da passive Systeme bereits in Tragstrukturen sehr hoher Gebäude etabliert sind, beschränkt sich die zu entwickelnde, methodische Unterstützung auf aktive Systeme.

3.4 Beispiel- bzw. Konstruktionskatalog adaptiver Strukturen

Adaptive Systeme für Tragstrukturen wurden im Rahmen von Studien und deren Umsetzung zu Forschungszwecken baupraktisch realisiert [TEUFFEL04, BLEICHER12, NEUHÄUSER13, FLAIG15, SENATORE18]. Anhang A.1 geht auf die Stuttgart SmartShell und die nachgewiesenen Potenziale der Bauweise näher ein. Weitere beispielhaft ausgewählte Systeme stellt Tabelle 3.1 neben der SmartShell vor. Die Darstellung ist ein Ausschnitt eines im Forschungsprojekt erarbeiteten Beispielkatalogs für adaptive Tragwerke und Gebäudehüllen, der im Sinn eines Konstruktionskatalogs auf bestehende Lösungen bzw. zugrundeliegende Lösungsprinzipien zu unterschiedlichen Problemen hinweist. Das Prinzip von Konstruktionskatalogen ist in der methodischen Produktentwicklung [ROTH01] als

auch im Bauwesen z. B. als „Stahlbau-“ [BOLLINGER11] oder „Holzbauatlas“ [KAUFMANN21] etabliert. Konstruktionskataloge stellen weitestgehend vollständige Sammlungen „bekannter und bewährter Lösungen“ dar, wobei deren Konkretisierungsgrad und deren Gliederung je nach Zielsetzung variiert [PAHL13, S. 375 ff.].

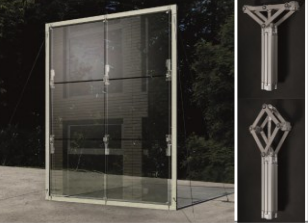


Adaptives Tragwerk Stuttgart SmartShell	Adaptive Seilfassade	Adaptive Spannbandbrücke	Adaptiver Fachwerksteg
			
[NEUHÄUSER14]	[FLAIG15]	[BLEICHER12]	[SENATORE18]
<u>Problem:</u> Wind, Schnee, Erdbeben oder durch die Nutzung hervorgerufene Lasten induzieren selten auftretende Spitzenbeanspruchungen, die zu einer materialintensiven Dimensionierung führen.	<u>Problem:</u> Windlasten verursachen bei Seilfassaden Schwingungen bzw. starke Verformungen, die inhomogene und damit ineffiziente Spannungsverteilungen ergeben.	<u>Problem:</u> Infolge der Minimierung des Konstruktionsgewichts nimmt die Schwingungsanfälligkeit der Spannbandbrücke bei zeitlich und örtlich veränderlichen Lasten zu.	<u>Problem:</u> Eine minimierte Durchbiegung des auskragenden Stegs unter Eigengewicht sowie auftretende Nutzlasten erfordern eine materialintensive Dimensionierung.
<u>Adaption:</u> Das Dämpfen von Schwingungen bzw. Homogenisieren von Spannungsspitzen durch Einleitung kleiner Verschiebungen an drei Auflagern mittels Hydraulikzylindern reduziert den Bemessungsquerschnitt.	<u>Adaption:</u> Scherenaktoren als Distanzelemente zwischen Seilen u. Glasscheiben spannen ein Doppelseil-Fassadensystem auf, um Verformungen zu kontrollieren und Bemessungsquerschnitte zu reduzieren.	<u>Adaption:</u> Der geregelte Eintrag von Kräften in die Geländerkonstruktion mittels darin integrierter pneumatischer Zugaktoren führt zur Dämpfung von Schwingungen mehrerer Eigenfrequenzen.	<u>Adaption:</u> In die Fachwerkstruktur integrierte elektromechanische Linearantriebe erhöhen die Steifigkeit und kompensieren die Verformung bei auftretender Belastung nahezu komplett.

Tabelle 3.1: Ausschnitt eines Beispielkatalogs adaptiver Tragwerkssysteme

Während bislang für die Nutzung realisierte adaptive Gebäude passive Systeme aufweisen und die Beispiele der aktiven Elemente als Prototypen in Realgröße umgesetzt wurden, folgt in Kapitel 5 die Beschreibung des weltweit ersten (Forschungs-) Gebäudes mit aktiven adaptiven Systemen im Tragwerk.

4 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Kapitel 1.2 leitete die Arbeit mit einer allgemein gefassten, grundlegenden Zielstellung ein. Eine Bewertung der vorgestellten Grundlagen und des Stands der Forschung ermöglicht eine weitere Konkretisierung und Abgrenzung der Aufgabenstellung. Zu diesem Zweck werden die Inhalte aus Kapitel 2 und 3 in Abschnitt 4.1 zunächst mit Bezug zur ersten Forschungsfrage zusammengefasst, wodurch auch die Ausgangssituation für die folgende Erarbeitung der methodischen Unterstützung beschrieben ist. In Abschnitt 4.2 wird auf die aufgedeckten Defizite aufgebaut und die Zielsetzung mittels Ableiten untergeordneter Forschungsfragen konkretisiert. Abschnitt 4.3 grenzt die Ergebnisse anhand der Erläuterung gegebener Randbedingungen dieser Arbeit weiter ab. Abschließend beschreibt Abschnitt 4.4 das Vorgehen zur Evaluation der Ergebnisse.

4.1 Bewertung der vorgestellten Grundlagen

Die Forschungsfrage 1 adressiert die Frage, auf welches Umfeld und welche bestehenden Planungs- und Entwicklungsprozesse ein Planungsprozess für adaptive Gebäude aufbaut. Aus dem Blickwinkel der methodischen Produktentwicklung können in Form einer Zusammenfassung aus den Erläuterungen von Kapitel 2 und 3 bezüglich existierender Grundlagen nachfolgende Aussagen getroffen werden:

- In der Produktentwicklung sind zahlreiche Vorgehensmodelle und Prozesse bekannt, die das Vorgehen und die Zusammenarbeit bei der Lösungsfindung beschreiben (vgl. Kapitel 2.2.2).
- Vorgehensmodellen liegen typischerweise die Hauptschritte der Problemlösung zugrunde (vgl. Kapitel 2.2.4).
- In der Produktentwicklung existiert eine Vielzahl an Methoden, deren Anwendung weitläufig etabliert ist (vgl. Kapitel 2.2.5).
- Die integrierte Produktentwicklung bezweckt die frühe Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen und deren jeweiligen Spezialisten für eine zielorientierte Kombination organisatorischer, methodischer und technischer Maßnahmen bzw. Hilfsmittel (vgl. Kapitel 2.2.6).
- Mechatronische Systeme veranschaulichen das Potenzial interdisziplinärer Zusammenarbeit (vgl. Kapitel 2.2.2.2).

- Gebäude werden typischerweise in Anlehnung an die Leistungsphasen der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HAOI) geplant (vgl. Kapitel 2.3.1). Ein anerkannter Prozess analog zur VDI 2221 bzw. VDI 2206 für die Entwicklung technischer bzw. mechatronischer Systeme ist nicht bekannt.
- Im traditionellen gewerkeorientierten Planungsansatz integriert der Architekt die Leistungen von Spezialisten bzw. sogenannten Fachplanern (vgl. Kapitel 2.3.1).
- Integrale Planungsansätze sind als Pendant zur integrierten Produktentwicklung im Bauwesen bekannt (vgl. Kapitel 2.3.2) und zeigen Potenziale zur Optimierung vorgestellter Herausforderungen sowie bestehender Planungs- bzw. Bauprozesse (vgl. Kapitel 2.10).
- Der Bauteam-Ansatz (vgl. Kapitel 2.3.2.2) zeigt durch den Grundsatz der Integration von ausführenden Firmen mögliche Szenarien, um Unternehmen in die Planung (adaptiver Gebäude) einzubinden, die KnowHow in der Konstruktion, Fertigung und auch baulichen Integration von adaptiven Systemen aufweisen.
- Entsprechend der MacLeamy-Kurve führt eine in frühen Stadien geführte, intensive Auseinandersetzung bzgl. der zu integrierenden Leistungen der Planungsbeteiligten zu einer Optimierung des Planungsergebnisses und geringeren Aufwänden im Fall von Änderungen (vgl. Kapitel 2.3.4).
- Die Gegenüberstellung abstrahierter Vorgehensmodelle der Produktentwicklung und Architektur zeigen - aufgrund gemeinsamer Ursprünge - grundlegende Ähnlichkeiten auf (vgl. Kapitel 2.42.3.4). Folglich scheint die Eignung eines gemeinsamen Vorgehens realistisch zu sein.
- Methoden entsprechend denen der Produktentwicklung sind im Bauwesen weniger bekannt, selten (bewusst) angewandt und somit nicht etabliert. Die Eignung bzw. das Potenzial eines Transfers von Produktentwicklungsmethoden in das Bauwesen ist bereits nachgewiesen (vgl. Kapitel 2.9).
- Grundlagen zur Erarbeitung von Prozessen liegen umfassend vor (vgl. Kapitel 2.4).
- Die Anforderungsdefinition und das anknüpfende Anforderungsmanagement als Bestandteile des Requirements Engineering fördern die frühzeitige Auseinandersetzung mit dem Lösungsraum bzw. der Zielsetzung einer Problemstellung. Jedoch werden im Bauwesen Anforderungen unzureichend ermittelt bzw. definiert (vgl. Kapitel 2.6).
- Allgemeine Methoden zur Analyse und Bewertung von Umweltwirkungen (vgl. Kapitel 2.7) sowie Sicherheitsaspekten (vgl. Kapitel 2.8) existieren.

- Die Trennung zwischen Planung und Ausführung erschweren im Bauwesen den Umgang mit Wissen bei der Planung (vgl. Kapitel 2.10).
- Der Vergleich zwischen Baubranche und Maschinenbau zeigt Gemeinsamkeiten als auch Differenzen auf und ist wegen der jeweiligen Vielseitigkeit stark abhängig von den für den Vergleich zu berücksichtigenden Randbedingungen (vgl. Kapitel 2.11).
- Die Vorteile adaptiver Tragwerke zeigen ein großes Potenzial hinsichtlich reduzierter Umweltwirkungen auf, welches an Prototypen nachgewiesen ist (vgl. Kapitel 3).

Anhand der existierenden Grundlagen wird in Bezug auf die Forschungsfrage 1 auch ersichtlich, welche Forschungslücke für eine zielgerichtete Planung adaptiver Tragwerke vorliegt. Analog zu den existierenden Grundlagen lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Eine umfassende Analyse, wie ein adaptives Gebäude mit Einbeziehung notwendiger Disziplinen strukturiert bzw. zielführend geplant werden kann, und eine darauf aufbauende Beschreibung eines Planungsprozesses ist nicht bekannt.
- Weiterhin sind auch die Randbedingungen an die methodische Unterstützung, beispielsweise in Form einer Anforderungsdefinition, nicht umfassend identifiziert, die für die zielgerichtete Konzeption und Ausgestaltung hinsichtlich einer späteren zweckmäßigen Anwendbarkeit erforderlich sind. Darunter fällt die Erkenntnis, welche Planungsaktivitäten primär zu unterstützen sind.
- Somit liegt auch keine die erforderlichen Disziplinen einbeziehende methodische Unterstützung für die vollumfängliche Planung adaptiver Tragwerke bzw. Gebäude vor.
- Daneben fehlen in der Literatur Vorschläge, wie sich eine Sammlung von Methoden, z. B. in Form eines Methodenbaukastens, und ein Prozess zweckmäßig verknüpfen lassen.
- Adaptive Systeme für Gebäude wurden bereits als Prototypen bzw. in Studien entwickelt. Ein Hochhaus mit adaptiver Tragstruktur, deren adaptive Elemente für große Gebäudehöhen skalierbar sind, existiert noch nicht.

In Bezug zu Forschungsfrage 1 wird das Fazit gezogen: Ansätze zum interdisziplinären Planen bzw. Entwickeln werden in beiden Branchen als wichtig angesehen. Es liegt aufgrund der Vielzahl an Methoden und Prozesse seitens methodischer Produktentwicklung die Kenntnis vor, „wie“ im Allgemeinen eine methodische Unterstützung gestaltet werden kann bzw. soll, jedoch existieren für den vorliegenden Kontext weder entsprechende Ansätze noch eine Erfassung von zugrunde zu legender Randbedingungen.

4.2 Konkretisierung der Zielsetzung und weiterer Forschungsfragen

Aufbauend auf der Vorstellung und Bewertung der Grundlagen bleibt das übergeordnete Ziel dieser Arbeit entsprechend der Zielsetzung in Kapitel 1.2 bestehen, sodass eine methodische Unterstützung in Form eines disziplinenübergreifenden Vorgehens zu erarbeiten ist. Für die zielgerichtete Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage sind weitere Forschungsfragen aufzustellen. Zur Konkretisierung werden diese, analog zu Forschungsfrage 1 in Kapitel 1.2, in untergeordnete Fragestellungen gegliedert und nachfolgend mit dem weiteren Vorgehen kapitelweise vorgestellt.

Im Folgenden liegt das Augenmerk zunächst auf der Tatsache, dass für die Unterstützung bisher keine ausreichende Informationsbasis in Form zu berücksichtigender Randbedingungen und Erkenntnisse vorliegt, um einen Planungsprozess auf Basis vorangegangener Planungen adaptiver Tragwerke abzuleiten. Zum einen liegen Handlungsempfehlungen typischerweise analysierte und unter Berücksichtigung der Situation zum Erfolg führende Prozesse zugrunde [LINDEMANN09, S. 36], zum anderen ist das Vergegenwärtigen von Anforderungen, die an eine methodische Unterstützung zu stellen sind, für deren zielgerichtete Entwicklung bzw. Erfüllung notwendig [BENDER05, S. 21]. Das bedeutet, dass in einem ersten Schritt fehlende Randbedingungen für den Prozess zunächst zu identifizieren sind und erst dann die Erarbeitung der eigentlichen methodischen Unterstützung erfolgen kann.

Für den ersten Schritt bietet sich aufgrund der bislang gegebenen Einzigartigkeit die Auseinandersetzung mit der Planung des adaptiven Tragwerks des Experimentalhochhauses an, weshalb Kapitel 5 für die Nachvollziehbarkeit dessen Planungsvorgehen abstrahiert vorstellt und dabei aufgetretene Herausforderungen aus Sicht aller Planungsbeteiligten aufzeigt. In diesem Zusammenhang erfolgt auch die Erläuterung der für Hochhäuser entwickelten adaptiven Tragwerkselemente. Unter Verwendung der dabei resultierenden Erkenntnisse leitet Kapitel 6 Anforderungen an den Planungsprozess sowie identifizierte Planungsschritte mit methodischem Unterstützungsbedarf ab. Die in Kapitel 5 und 6 zu beantwortenden Fragestellungen lauten:

Forschungsfrage FF2: Welche Änderungen am konventionellen Planungsablauf resultieren aus der Realisierung von adaptiven Gebäuden am Beispiel des Experimentalhochhauses des SFB 1244?

- Welche Schritte waren für die Planung des Experimentalhochhauses notwendig?

- Welche Funktionalität war in das adaptive Tragwerk zu integrieren und wie ist die konstruktive Lösung gestaltet?
- Welche Herausforderungen waren bei der Planung zu bewältigen und welche weiteren Erkenntnisse können aus der Planung gewonnen werden?
- Welche Planungsaktivitäten sollten primär durch Methoden unterstützt werden?
- Welche Anforderungen lassen sich für den zu entwickelnden Prozess bzw. die methodische Unterstützung ableiten?

Entsprechend der Zielsetzung in Kapitel 1.2 besteht die zu entwickelnde Unterstützung aus einem disziplinenübergreifenden (prozessualen) Vorgehen als auch Methoden, die komplexe und bedeutsame Schritte dieses Planungsprozesses unterstützen. Um (langfristig) eine Transparenz zu schaffen, für welche Prozessschritte bereits eine Unterstützung durch im Kontext adaptiver Gebäude erprobte Methoden gegeben ist, sollen als ein erster Lösungsansatz der Prozess und die Methoden mit Hilfe eines dafür geeigneten Darstellungsformats gekoppelt werden. In Anlehnung an Kapitel 2.1.3 sind die Methoden dazu systematisch zu erfassen. Für deren Anwendung im interdisziplinären Umfeld sollten die Methoden von allen Beteiligten auffindbar sein, sodass im Bedarfsfall die jeweils passende Methode ausgewählt werden kann. Als zweiter Lösungsansatz wird das Ziel verfolgt, den Zugang zu existierenden Produktentwicklungsmethoden für das Bauwesen (und somit auch für die Planung adaptiver Gebäude) mit Hilfe einer Aufbereitung weiterer zur Verfügung stehender Methoden vereinfacht werden. Zur Abgrenzung der Forschungsergebnisse dient Forschungsfrage 3, mit untergeordneten Fragestellungen:

Forschungsfrage FF3: Wie lassen sich Methoden verschiedener Disziplinen für die Planung und Entwicklung adaptiver Gebäude zielgerichtet bereitstellen?

- Wie lassen sich Methoden systematisch erfassen?
- Welche Konzepte bestehen, um eine Sammlung an Methoden auch Fachfremden übersichtlich darzustellen und eine bedarfsgerechte Auswahl zu unterstützen?
- Wie lässt sich eine Sammlung an Methoden mit einem Prozess koppeln?
- Wie lässt sich die Vielzahl von Produktentwicklungsmethoden und deren Vielseitigkeit auch Fachfremden anschaulich vermitteln, um gleichzeitig eine Methodenauswahl zu ermöglichen?

Kapitel 8 vervollständigt die Erfüllung der Zielsetzung dieser Arbeit und stellt schließlich die eigentliche methodische Unterstützung, d. h. die Bestandteile des Prozesses und die transferierten Methoden, vor. Die Ausgestaltung der Unterstützung erfolgt unter Einbe-

ziehung der Teilergebnisse von Kapitel 5 bis 7 und insbesondere der darin enthaltenen Anforderungen bzw. des abgeleiteten Bedarfs. Entsprechend Kapitel 2.5.1 sind für den Prozess die Phasen und Aktivitäten abzugrenzen und ggf. durch Begleit- bzw. Querschnittsprozesse zu ergänzen (vgl. Kapitel 2.2.3). Außerdem sind die unterstützenden Methoden einschließlich deren Integration in den Planungsprozess zu erläutern.

Um die Logik des Prozesses hervorzuheben, soll abschließend geprüft werden, ob sich das Vorgehen auch abstrakter (vgl. Kapitel 2.2.3) in Form eines Vorgehensmodells abbilden lässt. Zudem soll ein Vergleich mit anderen Vorgehensweisen Gemeinsamkeiten und Unterschiede aufzeigen.

Die Inhalte des Kapitels 8 umfassen die Beantwortung nachfolgender Fragestellungen:

Forschungsfrage FF4: Welche Schnittstellen zwischen Disziplinen und deren Aktivitäten existieren in den frühen Phasen des Planungsprozesses adaptiver Tragwerke und wie können jeweilige Ergebnisse systematisch erarbeitet werden?

- Welche Aktivitäten und Phasen sind Bestandteil des Prozesses für die Planung adaptiver Tragwerke auf Grundlage der Planung des Experimentalhochhauses?
- Welche Begleit- bzw. Querschnittsprozesse sind für die Planung notwendig?
- Welche (existierenden) Methoden eignen sich zur Unterstützung der (primär zu unterstützenden) Planungsaktivitäten und wie lassen sich diese in den Prozess integrieren?
- Lässt sich der Planungsansatz in einem abstrahierten Vorgehensmodell, wie z. B. dem V- oder W-Modell, abbilden und welche Analogien bestehen zu verwandten Vorgehensweisen?

Zur Abgrenzung der Evaluation der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Forschungsergebnisse dient eine letzte Fragestellung. In der Evaluation ist zu klären, ob die erarbeiteten Ergebnisse aus Sicht der an der Planung des Experimentalhochhauses Beteiligten eine Unterstützung darstellen. Die Vorgehensweise und Randbedingungen zur Evaluation der Ergebnisse sind in Kapitel 4.4 näher beschrieben.

Für die Erarbeitung der Ergebnisse wird auf Grundlage der konkretisierten Zielsetzung folgende übergeordnete Forschungshypothese zugrunde gelegt:

Durch die Entwicklung eines Planungsprozesses und einem verknüpften Methodenbaukasten wird die Planung adaptiver Tragwerke operationalisiert und methodisch unterstützt.

Die Beantwortung der vorgestellten Forschungsfragen unterliegt verschiedenen Randbedingungen, die im Folgenden mit dem Einfluss auf die zu erarbeitenden Ergebnisse kurz erläutert werden.

4.3 Abgrenzung und berücksichtigte Randbedingungen der Arbeit

Neben der in Kapitel 1.2 vorgenommenen Fokus- bzw. Schwerpunktsetzung ist der Inhalt der Arbeit aufgrund gegebener Randbedingungen weiter abzugrenzen. Die Vorstellung der durchlaufenen Planung in Kapitel 5 veranschaulicht das planerische Gesamtverhalten eines adaptiven Gebäudes, erfordert aufgrund der vielseitigen Informationen jedoch ein Abstrahieren. Entsprechend ist auch die zu entwickelnde bzw. in Kapitel 8 vorgestellte methodische Unterstützung im Sinne eines generischen Prozesses (vgl. Kapitel 2.2.3) zu verstehen, die die Vorgehensweise in allgemeiner Form aufzeigen soll.

Im Bauwesen sind Wechsel zwischen den beteiligten planenden, entwerfenden bzw. ausführenden Firmen typisch und auf die Vergabe von einzelnen Leistungsphasen an unterschiedliche Planer bzw. Firmen („Mehrfirmenmodell“) zurückzuführen [BERGMANN13, S. 66]. Dadurch entstehende Iterationen sowie Mehraufwände in der Kommunikation können im Prozess aufgrund deren projektspezifischen Erscheinungsformen nicht abgebildet werden. Die methodische Unterstützung lässt sich daher so auffassen, dass alle beteiligte Planer und ausführende Firmen während des Projekts von Anfang bis Ende jeweilige Verantwortlichkeiten beibehalten („Einfirmenmodell“).

Die von der methodischen Unterstützung adressierten Phasen lassen sich im Gebäudelebenszyklus (vgl. Bild 2.3) hervorheben. Bild 4.1 grenzt die Bestandteile des Prozesses und die darin methodisch zu unterstützende Planung ab, wobei der Schwerpunkt entsprechend des Farbverlaufs auf dem frühen Planungsstadium liegt.



Bild 4.1: Fokussierung der zu erarbeitenden Unterstützung im Gebäudelebenszyklus

Die methodische Unterstützung begrenzt sich auf die technische Realisierbarkeit, die für die zukünftige Entwicklung adaptiver Tragwerkssysteme grundlegend ist. Die Arbeit stellt daher Aspekte wie Nutzeranforderungen oder Kostenentwicklungen zurück, was jedoch keineswegs als Herabstufung in der Relevanz zu verstehen ist, sondern durch den bisher gewonnenen Wissensstand begründet ist.

Die zu erarbeitende methodische Unterstützung ist für aktive Systeme vorgesehen, wobei dadurch deren Anwendung im Kontext sonstiger Systeme nicht ausgeschlossen ist.

4.4 Hinweise zur Evaluation

Die in den nachfolgenden Kapiteln erläuterten Ergebnisse sind zur Sicherstellung der wissenschaftlichen Güte bzw. Richtigkeit in der Aussage zu evaluieren [vgl. BLESSING09, S. 182 ff.]. Aufgrund nicht gegebener Randbedingungen für eine Anwendungsevaluation [vgl. BLESSING09, S. 181 ff.], zu denen ein (im finanziellen und zeitlichen Rahmen nicht realisierbares) erneutes Durchlaufen des Planungsprozesses für ein adaptives Tragwerk mit bestenfalls bisher unbeteiligten Planern zählt, ließ sich diese Evaluationsform im Rahmen der Arbeit nicht umsetzen.

Gemäß DRM ist die alternativ durchgeführte Form der Evaluation als Unterstützungsevaluation (Support Evaluation) anzusehen. Die Unterstützungsevaluation dient dazu, Zwischenergebnisse hinsichtlich der Konsistenz, d. h. sinnvoller Zusammenhang ohne Widerspruch, der Vollständigkeit und der Logik abzuprüfen, um die Ergebnisse als verlässliche Grundlage bei nachfolgenden Forschungsschritten nutzen zu können. [BLESSING09, S. 176 f.]

Zur Verifikation der Forschungshypothese aus Kapitel 4.2 besteht bei der Evaluation das Ziel, von Experten die Forschungshypothese bestätigen zu lassen, sodass die vorgestellten Ergebnisse aufzeigen, wie adaptive Tragwerke geplant werden können und das Vorgehen im Vergleich zur Planung des adaptiven Experimentalhochhauses vereinfacht werden kann. Wünschenswert ist dabei, dass die Erfüllung möglichst vieler Ziele der Konstruktions- bzw. Entwicklungsmethodik nach Ehrlenspiel und Meerkamm [EHRLENSPIEL17, S. 13] aus Bild 2.5 angesprochen werden, um einen vielseitigen Mehrwert zu generieren. Ein weiteres Ziel der Evaluation ist es, die Ergebnisse hinsichtlich eines gemeinsamen Meinungsbilds als Grundlage für zukünftige Planungsprojekte als auch Forschungsaktivitäten von adaptiven Tragwerken abzusichern sowie Ansätze zur Verbesserung zu erfassen. Von Bedeutung ist insbesondere die Einschätzung der Anwendbarkeit der methodischen Unterstützung und der durch die Anwendung entstehende Mehrwert.

Da die Teilergebnisse der Arbeit thematisch aufeinander aufbauen, folgen unmittelbar nach deren Vorstellung im jeweiligen Kapitel die zugehörigen Evaluationsergebnisse. Die Evaluationsergebnisse stammen aus einer Evaluation, in deren Rahmen alle relevanten Teilergebnisse dieser Arbeit zusammenhängend vorgestellt und von Evaluationspartnern begutachtet wurden. Darüber hinaus konnten während der gemeinsamen Betreuung

zweier interdisziplinärer studentischer Entwurfsstudios adaptiver Gebäude Teilergebnisse erprobt und gewonnene Erkenntnisse im Weiteren berücksichtigt werden. Durch das Vorgehen wurde bereits vor dem Evaluationszeitpunkt ein entsprechender Reifegrad der Ergebnisse angestrebt.

Aufgrund der allgemeinen Neuheit adaptiver Systeme im Bauwesen und hinsichtlich des für die Evaluation der Ergebnisse empfehlenswerten bzw. erforderlichen Erfahrungswissens erfolgte die Evaluation mit internen und externen Beteiligten des Forschungsprojekts. Diese sind mit dem Ziel der Adaptivität und den Randbedingungen durch jeweilige Forschungs- bzw. Planungsleistungen im Kontext des adaptiven Tragwerks des Experimentalhochhauses vertraut. Zu den internen Beteiligten zählen dem Sonderforschungsbereich angehörige wissenschaftliche Mitarbeiter, die externen stellen baupraktisch erfahrene Planer dar, deren Planungsleistungen honoriert wurden.

Tabelle 4.1 stellt eine Übersicht der Evaluationspartner mit deren Position und Tätigkeitsfeld dar. Im Rahmen der Evaluation wurden die im Nachfolgenden erläuterten Ergebnisse vorwiegend in Einzelgesprächen in Präsentationsform vorgestellt und anhand eines geleiteten Interviews thematisch abgegrenzt diskutiert. Als Leitfaden diente der Fragebogen im Anhang A.5. Die Termine zur Evaluation dauerten jeweils zwischen 2 und 3,5 Stunden.

Interne Evaluationspartner mit jeweiligem Fachgebiet (wissenschaftliche Mitarbeiter)	Externe Evaluationspartner mit jeweiliger Funktion
Architektin, interne Koordination der Planung des adaptiven Hochhauses	Leitender Architekt und Projektkoordinator
Tragwerksplaner, bautechnische Integration aktiver Elemente	Tragwerksplaner und Vorstand des Unternehmens
Systemdynamiker, bautechnische Integration sowie Steuerungs- und Regelungskonzepte	Tragwerksplanerin und Projektleiterin Tragwerksplanung
Systemdynamikerin, Steuerungs- und Regelungskonzepte für adaptive Bauwerke	Bauherrenvertreter des Universitätsbauamts
Maschinenbauingenieur, beteiligter Konstrukteur der Actorik	

Tabelle 4.1: Übersicht der Evaluationspartner

5 Planung des Experimentalhochhauses des SFB 1244

Das Experimentalhochhaus dient dem Zweck, die innerhalb des Forschungsprojekts entwickelten Funktionen unter möglichst praxisnahen Bedingungen zu erproben und Erkenntnisse für zukünftige Forschungsaktivitäten zu gewinnen [SFB1244 2021]. Das gemeinsame Ziel von Kapitel 5 und 6 ist die Beantwortung der Forschungsfrage 2, welche Änderungen am konventionellen Planungsablauf aus der Realisierung von adaptiven Gebäuden am Beispiel des Experimentalhochhauses des SFB 1244 resultieren. Für die Beantwortung beschreibt Kapitel 5.1 zunächst das Vorgehen bei der Planung des Gebäudes und der Entwicklung der in das Tragwerk integrierten Aktorik anhand eines Prozessdiagramms. Anschließend vertieft Kapitel 5.2 das Vorgehen bei der Konstruktion der adaptiven Elemente und veranschaulicht dessen Funktionen. Kapitel 5.3 fasst während der Planung aufgetretene Herausforderungen zusammen.

5.1 Vorgehensweise während der Planung

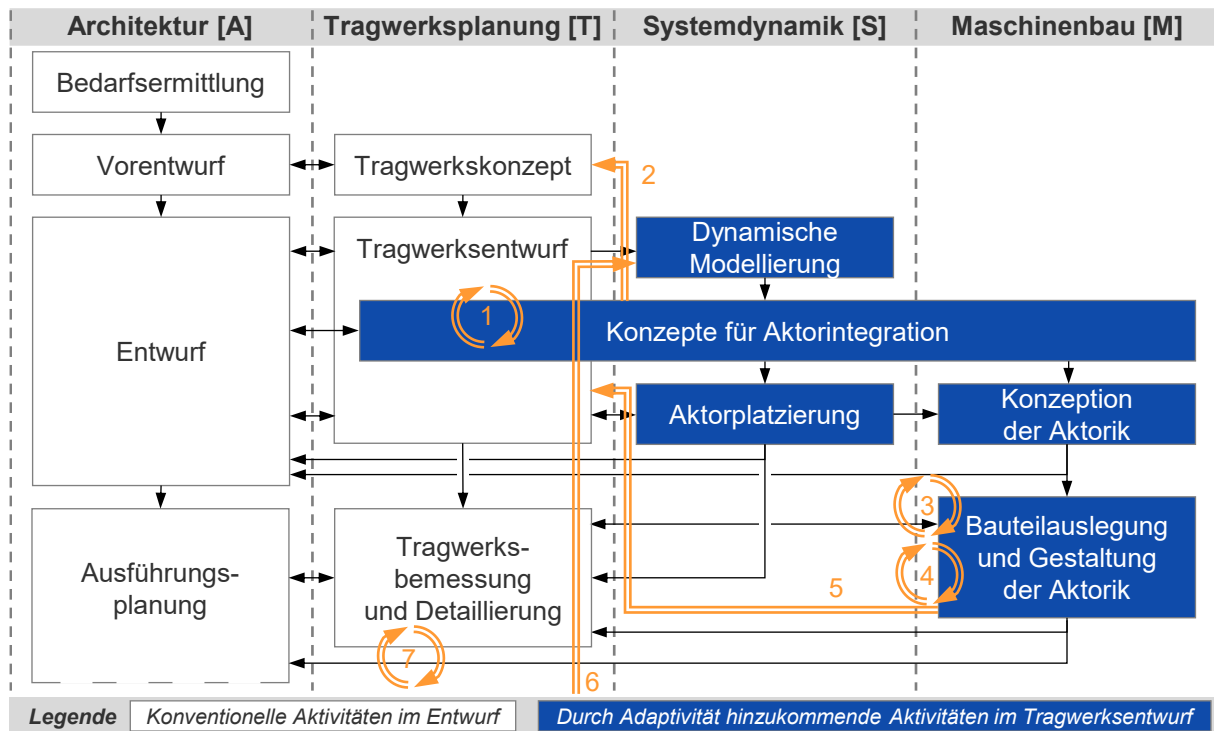
Parallel zum Planungsfortschritt wurden die wesentlichen Aktivitäten der Planungsbeteiligten, jeweilige Schnittstellen und Teilergebnisse in einem Flussdiagramm festgehalten [HONOLD19A]. Die Darstellung dient dem Zweck, die Aktivitäten und deren Vernetzung zur Analyse von Optimierungspotenzialen aufzuzeigen und die Grundlage zur Ableitung wesentlicher Anforderungen an die methodische Unterstützung zu bilden. Eine höhere Anzahl von Bestandteilen mit untergeordneter Bedeutung erforderte die bereits erwähnte Abstraktion der Inhalte. Bild 5.1 zeigt einen Ausschnitt der abstrahierten Darstellung mit Fokus auf die frühen Planungsphasen bzw. den Entwurf und ordnet den maßgeblich bei der Planung des adaptiven Tragwerks beteiligten Disziplinen Architektur, Tragwerksplanung, Systemdynamik und Maschinenbau die vorgenommenen Aktivitäten zu. Die Aktivitäten sind in der zeitlichen Abfolge abgebildet und deren Abhängigkeiten durch Pfeile gekennzeichnet. Der Austausch zwischen der Architektur und der Tragwerksplanung während des Entwurfs ist geläufig und jeweilige Aufgaben mit jeweiligen Schnittstellen gehören zu konventionellen Aktivitäten im Entwurf. Die Interaktionen beider etablierter Disziplinen mit der Systemdynamik und dem Maschinenbau sind jedoch insbesondere in diesem Projektstadium ein Novum und stellen durch die Adaptivität hinzukommende Aktivitäten im Tragwerksentwurf dar. In der in Bild 5.1 abgegrenzten Zeitspanne wurden die wesentlichen im nachfolgenden beschriebenen Optimierungsansätze für ein zukünftiges Planungsvorgehen identifiziert. [vgl. HONOLD19A]

Die Konzeption des Forschungsprojekts sah die Planung und Errichtung eines Experimentalhochhauses in konventioneller Vorgehensweise bzw. Ausführung vor, das sukzessive anhand resultierender Forschungsergebnisse in ein adaptives Gebäude überführt wird. Die Planung des Experimentalhochhauses erfolgte folglich in Anlehnung an die Phasen der HOAI (vgl. Kapitel 2.3.1). Die Grundlage bildete eine anfangs vorgenommene Bedarfsermittlung, in der von Beteiligten innerhalb des Forschungsprojekts für die Planung relevante Anforderungen und Wünsche für Forschungs- bzw. Versuchszwecke gesammelt wurden. Anwendung fand dabei die in Kapitel 8.4.2 vorgestellte Webapp zur Erfassung von Anforderungen. Aufbauend auf der Grundlagenermittlung (Leistungsphase 1, vgl. Bild 2.11) erfolgte der Vorentwurf des Gebäudes. Aufgrund der als Testgebäude geplanten Nutzung und dem Fokus auf adaptive Hüllen und Strukturen war die innenarchitektonische Gestaltung von untergeordneter Bedeutung. Vielmehr sollte die Schlankheit, d. h. das Verhältnis zwischen Grundriss und Bauhöhe, bestmöglich den Eigenschaften eines großen Hochhauses entsprechen. Auf Grundlage der Anforderungen konnten erste passive Tragwerkskonzepte erarbeitet sowie die Entscheidung für eine externe Erschließung der Stockwerke mittels eines nebenstehenden Treppenturms getroffen werden. Architektonische und tragwerksspezifische Grundlagen zur Planung des Experimentalhochhauses stellen Weidner et al. [WEIDNER18; WEIDNER19] vor.

Nach der Erarbeitung des Vorentwurfs (Leistungsphase 2) begannen Forschungsbeteiligte aus der Systemdynamik die Planungsaktivitäten, indem das Tragwerkskonzept und Eigenschaften wie Masse, Verbindungstechniken etc. modelliert und für verschiedene Lastfälle simuliert wurden („dynamische Modellierung“). Die Simulation zeigt über den Zeitverlauf die (Spitzen-)Lasten und die Verschiebung der Tragwerkskomponenten in Abhängigkeit der Parameter äußerer Störgrößen auf. Zu den Parametern gehören beispielsweise die Windgeschwindigkeit und -richtung. Außerdem resultiert aus der Simulation, welche Stellgrößen (Stellkräfte, -wege und -geschwindigkeiten) der Aktorik notwendig sind, um das Tragwerksverhalten an ausgewählten Positionen zu beeinflussen [WAGNER17, S. 49 ff.]. Bei der Auswahl wurden die Ziele einer statischen Kompensation und dynamischen Dämpfung verfolgt [WAGNER18, S. 592].

Die ermittelten Größenordnungen der Stellgrößen dienten als Grundlage für eine erste Ideenfindung, in der Konzepte für die Integration von Aktoren ins Tragwerk formuliert wurden. Bei dieser Suche nach geeigneten Wirkprinzipien erwies sich die Einbindung des Fachgebiets des konstruktiven Maschinenbaus erforderlich. Die generierten Ideen wurden hinsichtlich der Realisierbarkeit von Seiten des Maschinenbaus (u. a. konstruktive

Machbarkeit, erforderlicher Bauraum), der Tragwerksplanung (u. a. verfügbarer Bauraum, konstruktive Integration) und Systemdynamik (u. a. Stellgrößen) bewertet und gemeinsam iterativ optimiert. Im nachfolgenden Abschnitt 5.2 wird die Konzeption und die finale Konstruktion der Aktorik ausführlicher vorgestellt.



Iterationen aufgrund von

1. Konzeptfindung (Wirkprinzipien) und Modularisierung
2. Wechsel Materialität Tragwerk (Holz → Stahl)
3. Lieferbarkeit von Werkstoffen (Festigkeit)
4. Lieferbarkeit von Normteilen (Nenngröße)
5. Teilevielfalt bei Herstellung des Prototyps
6. Max. Auslenkung und zul. Lastspielzahl
7. Lieferbarkeit von Halbzeugen (Nennmaße)

Wesentlich **betroffene Disziplin(en)**:

- [T/M]
- [T]
- [M]
- [M]
- [T/M]
- [T/S]
- [T]

Bild 5.1: Abstrahiertes Vorgehen beim Entwurf des adaptiven Tragwerks, basierend auf Honold et al. [HONOLD19A] mit aufgetretenen Iterationsschleifen

Gleichzeitig entwickelte sich im Planungsteam die Erkenntnis, dass die nachträglich zu integrierende Aktorik grundlegende Anforderungen an das Tragwerkskonzept stellt. Darunter fallen beispielsweise für die Bemessung relevante dynamische Systemzustände und Lasten sowie Schnittstellen für die konstruktive Integration. Außerdem sind zu Forschungszwecken und zur Versuchsdurchführung für den Standort ungewöhnliche Anforderungen hinsichtlich der ertragbaren Lastspielzahl zu erfüllen. Eine nachträgliche Integration der Adaptivität würde demnach zu einem hohen konstruktiven Anpassungsaufwand und Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit des Systems führen. Das Entwurfsvorgehen sowie zugehörige Planungsergebnisse werden folglich durch eine Aktorik

maßgeblich beeinflusst, sodass diese beim weiteren Planungsvorgehen zentral zu berücksichtigen war. Als Konsequenz wurde das Gebäude mit dem Fokus auf eine unmittelbar mit adaptiven Systemen ausgerüstete Bauweise weiter geplant und errichtet.

Durch die Entscheidung erfolgte der Beginn der neuartigen interdisziplinären, planerischen Zusammenarbeit während der Entwurfsplanung (Leistungsphase 3). Das Team verfolgte das Ziel, in den Planungsstand eines konventionell entworfenen Tragwerks adaptive Elemente zu integrieren und gewann die Einsicht, dass dadurch eine weitläufige Überarbeitung des bis dato vorgesehenen Tragwerkskonzepts einschließlich erarbeiteter Tragwerkskomponenten (Geschossdecken, Stützelemente und Aussteifungselemente), Verbindungstechniken und Bauteileigenschaften erforderlich ist. Das daraus resultierende iterative Vorgehen ist in Bild 5.1 veranschaulicht. Iterationsschleife 1 steht im Rahmen der Konzeptfindung für die Entwicklung verschiedener Wirkprinzipien der Aktorik, erarbeitete Ansätze zur Integration und dazu notwendige Anpassungen am Tragwerkskonzept. Für eine Tauschbarkeit und um Stückzahleffekte bei der Fertigung zu nutzen, wurden erforderliche Komponenten modularisiert. Die Anpassungen am Tragwerk führten schließlich in Iteration 2 ausgehend von der Materialität Holz zu einer Stahlrahmenkonstruktion in Differentialbauweise und somit zu einem neuen Tragwerkskonzept. Ab diesem Zeitpunkt stand im Planungsgeschehen aufgrund fehlender Referenzbeispiele und der somit vollständigen Neuentwicklung der adaptiven Funktionalität die intensive Abstimmung von Planungsbeteiligten der Disziplinen Tragwerksplanung, Systemdynamik und Maschinenbau im Vordergrund.

Anknüpfend an die Ergebnisse der dynamischen Modellierung konnten parallel mit der Anwendung der Methode zur Aktorplatzierung [WAGNER17, S. S. 49 ff.] die Tragwerkskomponenten bestimmt werden, die als adaptives Element einen wirksamen Beitrag zur Beeinflussung des Systemverhaltens zu Gunsten einer Massen- und Energieeinsparung während des Betriebs des Gebäudes leisten. Mit Hilfe der Methode ergeben sich somit neben den individuellen Stellgrößen auch Empfehlungen für Positionen und Anzahl der Aktoren. Auf dieser Grundlage konnte für ein disziplinenübergreifend ermitteltes Vorzugskonzept die Grobgestalt (Bauteilarchitektur sowie vorläufige Herstellverfahren und Verbindungstechniken) im Rahmen der „Konzeption der Aktorik“ von den beteiligten Ingenieuren des Maschinenbaus erarbeitet und die zielgerichtete, detaillierte Entwicklung der Aktorik begonnen werden. Dabei erfolgte der Austausch mit der Tragwerksplanung hinsichtlich der konstruktiven Integration der Aktorik in das Tragwerk (Definition konstruktiver Schnittstellen), mit der Systemdynamik hinsichtlich der Erfüllung der systemtechnischen

Anforderungen (Stellweg und -geschwindigkeit) sowie zwischen der Tragwerksplanung und der Systemdynamik hinsichtlich der von den Aktoren einzubringenden Reaktionskräfte für verschiedene Lastfälle. Zur Sicherstellung der technischen Realisierbarkeit der Aktorik-Komponenten wurden wesentliche Querschnitte und kritische Verbindungsstellen vordimensioniert, geeignete Stähle ausgewählt sowie die Lösungskonzepte mit dem verfügbaren Bauraum abgeglichen. Aus dem iterativen Vorgehen (Iterationsschleifen 3 bis 5 in Bild 5.1, siehe auch Kapitel 5.2) resultierte jeweils für die Stütze und Aussteifung die Auswahl eines Aktuierungskonzepts. Auf dieser Auswahl sowie den fortlaufenden Abstimmungen beruhte die weitere Realisierung, zu der die Bemessung des Tragwerks und dessen Detaillierung als auch die Bauteilauslegung und (Fein-)Gestaltung der Aktorik gehört. Während der Ausführungsplanung des Tragwerks mussten aufgrund der Anforderungen an die gewünschte Auslenkung des Turms bei Schwingungen und den dadurch begrenzten Lastspielzahlen Querschnitte in Tragwerkskomponenten wesentlich erhöht (Iterationsschleife 6) und diese aufgrund der fehlenden Lieferbarkeit gewünschter Stahlprofile noch einmal gewechselt (Iteration 7) werden.

Ein Austausch wesentlicher Ergebnisse erfolgte zwar unmittelbar zwischen den betroffenen Disziplinen, die Aktivitäten koordinierten jedoch überwiegend Vertreter der Architektur. Der architektonische Entwurf griff die sukzessiven Entwicklungsschritte auf und erhielt dadurch einen zunehmenden Detaillierungs- bzw. Reifegrad.

5.2 Entwicklung der integrierten Aktorik

Für das grundlegende technische Verständnis der entwickelten Aktorik wird das Entwicklungsvorgehen seitens des Maschinenbaus und die realisierte Konstruktion kurz beschrieben. Die Inhalte beruhen auf den Beschreibungen von Burghardt et al. [BURGHARDT21; BURGHARDT23], auf die für tiefergehende Informationen verwiesen wird.

5.2.1 Vorgehensweise bei der Entwicklung

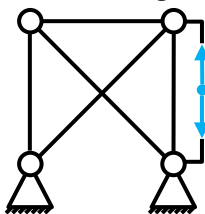
Die Aktorik wurde in Anlehnung an die Schritte der Richtlinie VDI 2221 (vgl. Kapitel 2.2.2.1) konstruiert. Dabei stellten die Bewertung geeigneter Integrationsformen der Aktorik in unterschiedliche Tragwerkselemente (wie Stützen und Aussteifungselemente) sowie die Definition jeweiliger Anforderungen erste relevante Meilensteine dar (Abschnitt 5.2.2). Als Voruntersuchung wurde aufgrund des Bedarfs einer hohen Leistungsdichte, d. h. hohe Stellkraft bei möglichst geringem Bauraum, die Eignung eines hydraulischen Aktors festgestellt und dieser anderen Systemen gegenübergestellt [WEIDNER18, S. 114]. Das dafür eingesetzte Diagramm zeigt Anhang A.6. Aufbauend auf dieser Aus-

wahl erfolgte die Suche nach geeigneten Wirkprinzipien bzw. -strukturen sowie erste Skizzen des Lösungskonzepts (Abschnitt 5.2.3). Bis zum Erreichen des zur Fertigung freigegebenen Reifegrads (Abschnitt 5.2.4) wurden iterativ die Konzepte detailliert, Baustrukturen und Bauteile entworfen bzw. ausgelegt sowie Normteile ausgewählt. Die Iterationsschleifen 3 bis 5 (vgl. Bild 5.1) waren aufgrund gegebener Rahmenbedingungen notwendig, zu denen die Lieferbarkeit genormter Halbzeuge und Normteile, der Herstellungsaufwand und der verfügbare Maschinenpark zählten. Durch die Planung und Inbetriebnahme eines Prototyps des adaptiven Tragwerks [vgl. WEIDNER19, S. 4 f.] wurden weitere Erfahrungswerte gewonnen (vgl. Abschnitt 5.2.4). Den zeitlich größten Anteil am Vorgehen erforderte die Ausarbeitungsphase, da die im Maschinenbau typischerweise detaillierten Zeichnungen als Fertigungsanweisung alle relevanten Informationen wie notwendige Toleranzfelder von Maßbereichen beinhalten. Diese stellten aufgrund der Bauteilgröße keine übliche Situation dar.

5.2.2 Konzeption der integrierten Aktorik

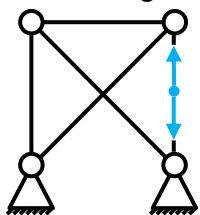
Zur Integration von Aktoren in den Kraftfluss von Tragwerken und dessen Beeinflussung sind drei Prinzipien bekannt [WAGNER18, S. 593]. Bild 5.2 stellt die parallele und die serielle Variante mit jeweiligen Vor- und Nachteilen gegenüber.

Parallele Integration



- Integration des Aktors parallel zu einem passiven Element
- Aufteilung des Kraftflusses in aktiven und passiven Strang
- + Aktorik nur durch anteilige Lasten beansprucht (reduzierter Energiebedarf)
- + skalierbares Konstruktionsprinzip für höhere Lasten
- Bedarf zusätzlicher Komponenten für Parallelstruktur
- Längenänderung begrenzt durch die werkstoffabhängige Streckgrenze des passiven Strangs
- exzentrischer bzw. inhomogener Kraftfluss ist konstruktiv zu vermeiden

Serielle Integration



- Integration des Aktors als Segment des aktuierten Elements
- Kraftfluss wird nicht aufgeteilt
- + einfache Realisierbarkeit eines symmetrischen bzw. homogenen Kraftflusses
- + keine Parallelstruktur erforderlich
- Aktor ist Bestandteil des gesamten Kraftflusses
- Skalierbarkeit ist für hohe Lasten beschränkt

Legende: • Neutrales Merkmal + Vorteil - Nachteil

Bild 5.2: Gegenüberstellung der Prinzipien zur Integration von Aktoren in Tragwerkelemente, basierend auf [WEIDNER18, S. 111 f.]

Die dynamische Modellierung des Tragwerksentwurfs des Experimentalhochhauses erwies, dass adaptive Elemente an acht Positionen der vier vertikalen Stützen und an 16 Positionen der 32 Aussteifungselemente eine hinreichende Beeinflussung des Tragwerks ermöglichen [WEIDNER19, S. 4]. Die Gegenüberstellung der Integrationsprinzipien bildete

die Entscheidungsgrundlage, in die Stützen das parallele und in die Aussteifungselemente das serielle Prinzip zu integrieren. Tabelle 5.1 fasst weitere aus Simulationen und dem Tragwerksentwurf abgeleitete Anforderungen an die Konstruktion der beiden adaptiven Systeme zusammen, wobei die endgültige Quantifizierung aufgrund des fortschreitenden Erkenntnisgewinns während der Entwicklung resultierte. Um die Vorteile einer Gleichteilstrategie zu nutzen, wurden für die Stützen- und Aussteifungselemente die Entscheidungen für jeweils einheitliche Systeme festgelegt. Die angegebenen maximalen Stellkräfte sind daher vom jeweils lastkritischsten Element abgeleitet.

Anforderung	Beschreibung/Quantifizierung		Verantwortliche Disziplin(en)
	Stütze	Aussteifung	
Integrationstyp	parallel	seriell	S, T, M
Regelgröße	Kraft im Stützensegment	Kraft im Aussteifungselement	S
max. Stellkraft; Belastungsfall	300 kN; Zug/Druck-wechselnd	400 kN; Zug-schwellend	S
Stellweg (theoretischer Wert)	+/- 5 mm	14 mm	S
Stellfrequenz	8 Hz	8 Hz	S
geometrische Schnittstelle	Integration in quadratisches Hohlprofil, Anbindung über projektspezifische Knotenpunkte	ober- und unterhalb befindliche, passive Segmente der Aussteifung	T, M
Bauraumbegrenzung (l x b)	Innenquerschnitt Hohlprofil mit Kantenmaß 270 mm	∅ 400 mm (aufgrund Fassadenabstand)	A, T
Bauraum (h)	entsprechend der Höhe des zu beeinflussenden Stützelements	geringe Höhe entspricht Optimierungsziel (Wunschanford.)	A, T
Aktortyp und Eigenschaft	Hydraulikzylinder, doppelwirkend	Hydraulikzylinder, einfachwirkend	M
Vorspannkraft	- nicht erforderlich -	5 kN	T

Legende: A: Architektur; T: Tragwerksplanung; S: Systemdynamik; M: Maschinenbau

Tabelle 5.1: Funktionale Anforderungen an die adaptive Stütze und Aussteifung [BURGHARDT21, S. 69]

Auf das Tragwerk wirken statische „unveränderliche“ Lasten, die aufgrund des Eigengewichts und der Nutzung in konstanter Höhe ständig auf das Tragwerk einwirken, sowie dynamische „veränderliche“ Lasten, die im Betrag von äußeren Einwirkungen wie Erdbeben oder Winde bzw. spezieller Nutzungsarten (z. B. Parkhäuser) variieren. Der Betrag der Stellkräfte wurde so festgelegt, dass diese in hinreichender Größe zu einer Beeinflussbarkeit des Tragwerks genügen. Entsprechend der Gegenüberstellung in Bild 5.2 teilt sich bei der parallelen Integration der Kraftfluss jeweils in mindestens einen aktiven und einen passiven Parallelstrang auf. Dadurch können hohe unveränderliche Lasten direkt abgeführt werden und sind nicht durch einen seriell integrierten Aktor aufzunehmen.

Dies stellt einen Vorteil des Integrationskonzepts für den Einsatz in höheren Gebäuden dar.

5.2.3 Adaptionen- und Wirkprinzipien

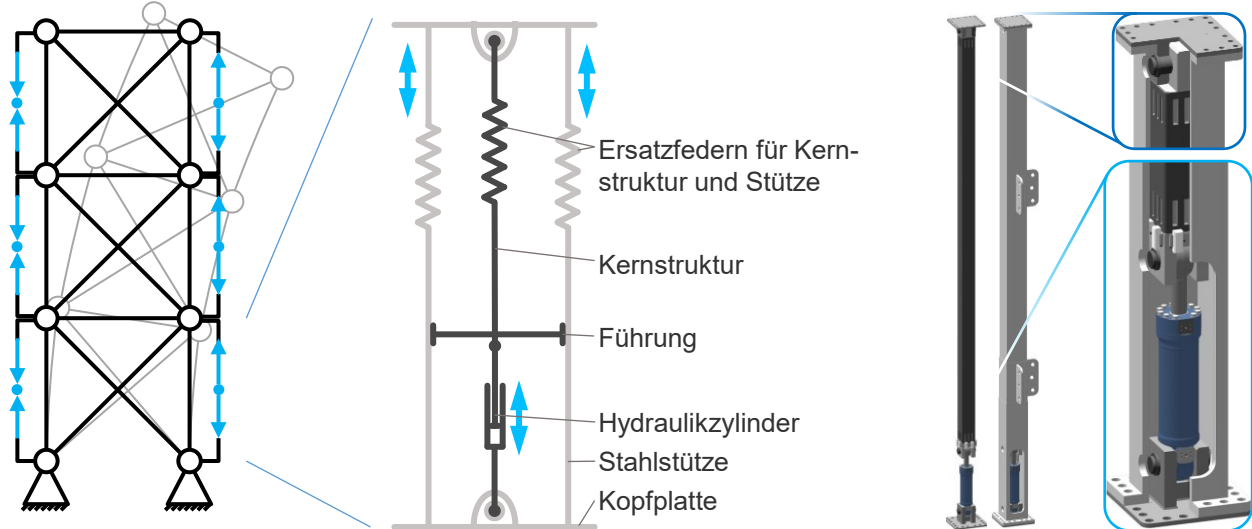
Basierend auf dem Tragwerksentwurf, der Vorauswahl geeigneter Aktortechnologien anhand des Diagramms „Stellkraft/-weg/Leistungsdichte“ (siehe [WEIDNER18, S. 114] bzw. Anhang A.6), den vorgestellten Anforderungen sowie einer Marktrecherche der Lieferfähigkeit existierender Aktoren bestand das Ziel, geeignete Wirkprinzipien zur Realisierung der Stellgrößen zu ermitteln. Diese bilden die Grundlage für die Lösungsprinzipien, wie sich die Aktorik konstruktiv in die Tragwerkselemente integrieren lassen. In Form einer stark überhöhten Darstellung veranschaulicht Bild 5.3 die Beeinflussbarkeit des Tragwerks durch das Adaptionprinzip in Stütze bzw. Aussteifung. Daneben ist das erarbeitete Wirkprinzip, das als Kernbestandteil des Lösungsprinzips die notwendige Funktionalität innerhalb eines Elements gewährleistet, abgebildet. Zur weiteren Veranschaulichung des umgesetzten Lösungsprinzips und als Vorgriff auf die Beschreibung in Kapitel 5.2.4 ist das CAD-Modell der ausgearbeiteten Konstruktion gegenübergestellt. Anhang A.7 beinhaltet als Ergänzung in diesem Stadium konzipierte alternative Ideen im Sinne eines Ansatzes für einen Konstruktionskatalog für Wirkprinzipien.

Die adaptive (Stahl-) Stütze besteht im passiven Strang aus einem Hohlprofil mit Verbindungsflansch. Über ober- und unterseitige Kopfplatten, die mit dem Flansch verschraubt sind, wird eine Kernstruktur als aktiver Strang innerhalb der Stütze fixiert. Die Kernstruktur entspricht einem innenliegenden Hohlprofil, in dem der Aktor als Segment eingesetzt ist. Zwischen beiden Hohlprofilen besteht nur im Bereich des Aktors Kontakt in Form einer Führung, die bei hoher Druckbelastung die Neigung des inneren Hohlprofils zum Ausknicken verringert.

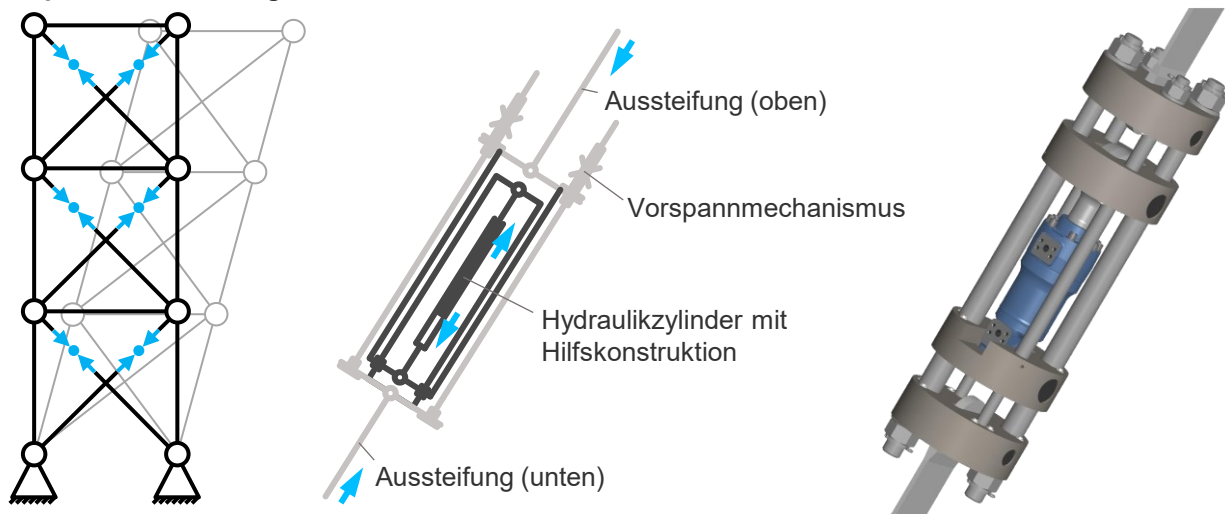
Zur Erläuterung der Funktionsweise ist zunächst eine unbelastete Stütze vorzustellen. Ein Ausfahren des Hydraulikzylinders sorgt für eine Druckkraft im inneren Profil und somit zu einer Längenzunahme des äußeren Profils bei gleichzeitiger Zunahme von Zugspannungen. Ein Einfahren des Aktors bewirkt jeweils eine Kraftumkehr und somit Druckspannungen sowie eine Verkürzung der Stütze. Die starre Konstruktion des äußeren Profils gibt vor, dass sich dessen Länge nur im Bereich der Streckgrenze des eingesetzten Stahls reversibel und daher im Bereich weniger Millimeter (siehe Tabelle 5.1) entsprechend des hookeischen Gesetzes verändern darf. Das elastische Verhalten der Profile deuten in Bild 5.3 die dargestellten Ersatzfedern an.

Ist die Stütze in einem Tragwerk verbaut, verläuft im kraftlosen Zustand des Aktors der Kraftfluss resultierend von darüberliegend wirkenden Kräften ausschließlich über den passiven Strang. Durch das Einbringen von Kräften am Aktor schaltet sich das innere Profil in den Kraftfluss ein und kann gezielt die äußere Struktur be- und entlasten.

Adaptive Stütze



Adaptives Aussteifungselement



Adaptionsprinzip
(Funktion)

Wirkprinzipien und
Lösungsprinzip

Ausgearbeiteter
Baugruppentwurf

Bild 5.3: Konkretisierungsschritte der Aktorik-Entwicklung für Stütze und Aussteifung

Im Vergleich zur Stütze trägt das Aussteifungselement im Verhältnis wesentlich höhere dynamische als statische Lasten, sodass eine serielle Integration geeignet und bezüglich der Gesamtmaße kompakter realisierbar ist [WEIDNER18, S. 115]. Aussteifungselemente bestehen in der Regel aus druckschlaffen Profilen bzw. Seilen. Die Aktorik in den Aussteifungselementen wird daher nur für das Einbringen von Zugkräften ausgelegt. Prinzipiell könnte ein konventioneller Aktor unmittelbar in den Kraftfluss eingesetzt werden.

Da handelsübliche Hydraulikzylinder konzeptbedingt höhere Druck- als Zugkräfte aufbringen können und die Konstruktion im Querschnitt des Aussteifungselements zu Gunsten des Platzangebots im Gebäude schlank zu realisieren war, musste eine Lastumkehr konstruktiv erfüllt werden. Ein ausfahrender Hydraulikzylinder führt daher im Bild 5.3 vorgestellten Lösungsprinzip zur gewünschten Zugspannung im Aussteifungselement. Bei gleichen Systemdrücken erwies sich der erforderliche Bauraum trotz Komponenten zur Lastumkehr kleiner als der eines direkt integrierten Aktors, da auch für diesen eine Hüllkonstruktion zur Vermeidung von Biegelasten aufgrund des Eigengewichts notwendig wäre. Im Wesentlichen besteht die Aktorik neben dem Aktor aus Plattenelementen und Zugankern, die durch Muttern als verstellbare Anschläge auch eine Vorspannkraft bzw. im Fall eines Druckausfalls am Aktor eine Mindestkraft sicherstellen.

5.2.4 Konstruktionsbeschreibung und Realisierung eines Funktionsprototypen

Nach der Festlegung der Wirkprinzipien wurden die Bauteile iterativ im Detail gestaltet und rechnerische Nachweise, im Wesentlichen anhand von analytischen Verfahren und in Einzelfällen mit der simulationsbasierten Finite-Elemente-Methode (FEM) vorgenommen. Die Gestaltung der Bauteile erfolgte ausgehend von den erforderlichen Halbzeugen mit dem Ziel einer möglichst geringen Spanarbeit während der Fertigung, da die Dimension der Bauteile die Grenzen konventioneller Werkstattausstattungen erreichte.

Ein Bestandteil der Planung des Experimentalhochhauses stellte die Realisierung eines Prototyps dar, der aus den Tragwerkselementen einer dreistöckigen Wand mit einer adaptiven Stütze und einer adaptiven Aussteifung in Realgröße umgesetzt wurde. Anhang A.8 beinhaltet zur Veranschaulichung eine Abbildung. Der Aufbau konnte zu Versuchszwecken genutzt und die Funktionstauglichkeit der Lösung nachgewiesen werden [WEIDNER19; BURGHARDT21; BURGHARDT23]. Zudem wurden bei der Fertigung und Montage der Bauteile Verbesserungspotenziale für die Umsetzung im Hochhaus identifiziert. Beide vorgestellten Adaptionprinzipien wurden zum Patent angemeldet. Die Offenlegungsschriften [UNISTUTT GART20A; UNISTUTT GART20B] beinhalten neben den Beiträgen von Burghardt et al. [BURGHARDT21; BURGHARDT23] weitere detailliertere Erläuterungen.

5.3 Herausforderungen und Erkenntnisse der Planung

Nach Herstellung der Fundamentplatte und zeitgleich zur Ausschreibung des Stahlbau-Leistungsverzeichnisses des adaptiven Tragwerks wurde von sieben beteiligten Evaluationspartnern (vgl. Kapitel 4.4) die Frage beantwortet, welche Herausforderungen aus der

jeweiligen Sicht bei der bisherigen Planung des Experimentalhochhauses aufgetreten sind. Die dabei ermittelten Herausforderungen dienen als weitere Motivation für die zu entwickelnde methodische Unterstützung. Die Antworten in Form von Aufzählungspunkten sind thematisch geclustert in Tabelle 5.2 festgehalten. Blau hervorgehoben sind die Punkte, in deren Kontext im Rahmen der Arbeit für zukünftige Planungen zumindest im Ansatz ein unterstützender Beitrag entwickelt wird.

Daneben lassen sich weitere Erkenntnisse aus der Planung festhalten. Hinsichtlich des gegenseitigen sprachlichen Verständnisses und der Arbeitsweise wurden von den Planungsbeteiligten widersprüchliche Rückmeldungen geäußert. Die innerhalb der bestehenden und hinzukommenden Disziplinen unterschiedliche Verwendung von Begrifflichkeiten und der gegenseitige Austausch fachspezifischer Ergebnisse stellte für einen Teil der Beteiligten ein Problem dar, für den anderen ausdrücklich nicht. Konträr wurde auch das serielle Abarbeiten von Arbeitsschritten (vgl. Kapitel 2.5.3) aus Sicht der Beteiligten des Bauwesens mit den hinzukommenden Disziplinen diskutiert, da letztere den parallelen Vorgehensstil innerhalb der Planung disziplinenübergreifend anstrebten.

Der Genehmigungsprozess des Gebäudes stellte entgegen den Erwartungen keine aufgeführte Herausforderung dar. Diese Tatsache ist auf einen unmittelbaren kooperativen Ansatz mit dem zuständigen Prüfstatiker und angestrebte Maßnahmen zur Überwachung des Gebäudezustands zurückzuführen.

Aufgrund des Fokus auf die technische Realisierung fehlte bei der Planung des adaptiven Tragwerks die Umsetzung der eigentlich im Vordergrund stehenden Nachhaltigkeitsziele. Die zugunsten des Forschungsbetriebs gestellten Anforderungen unterscheiden sich stark zu denen einer zukünftigen, konventionellen Nutzung, da die Komponenten für Versuchsreihen mit unüblich hohen Lastspielzahlen und für den Austausch durch zukünftig weiterentwickelte Konzepte vorbereitet sind. Bei der weiteren Entwicklung der methodischen Unterstützung sind jedoch die Aspekte der Nachhaltigkeitsziele von adaptiven Tragwerken zu verankern, sodass zukünftige adaptive Tragwerke auch tatsächliche Materialeinsparungen aufweisen.

Allgemeines

- Planung und Realisierung eines adaptiven Tragwerks für ein (Experimental-) Hochhaus stellte ein bisher ungelöstes einzigartiges Problem und folglich die zu erarbeitende Lösung für alle Planungsbeteiligten eine erstmalige Erfahrung dar
- Neue Disziplinen und neue Aktivitäten mit jeweiligen Ergebnissen im Planungs- und Entwurfsprozess erforderten eine neue Form der Zusammenarbeit (menschlich, organisatorisch, methodisch, technisch)

Forschungscharakter

- Methoden zur Lösung durch die Adaptivität resultierender Probleme mussten als Voraussetzung zum Planungsfortschritt erst erarbeitet und eingeführt werden
- Spagat zwischen Forschung und Planung/Realisierung führte zur unmittelbaren Bewährungsprobe für neue Methoden, theoretischen und konstruktiven Ergebnissen
- Definition diverser Anforderungen erfolgte ohne Kenntnisse möglicher Lösungsansätze
- Bewältigung der anfangs (fälschlich) getroffenen Annahme, dass die Aktorik auch noch nachträglich (wirtschaftlich) in das Tragwerk integriert werden kann
- Konstruktion, Herstellung und Inbetriebnahme der Aktorik, die dem Schwermaschinenbau zuzuordnen ist, erfordert spezielle Erfahrungen bei der Gestaltung, z. B. hinsichtlich Verfügbarkeit von Halbzeugen und geeigneten Fertigungsverfahren
- Anstreben eines Optimums im sogenannten Dreieck des Projektmanagements Kosten/Zeit/Qualität mit Innovationsgrad
- Zu knapp kalkuliertes Budget bzw. innerhalb der Planungszeit massiv gestiegene Baupreise

Tragwerksplanung (fachlich)

- Fehlende Klassifizierung des Gebäudes hinsichtlich der Anwendung von Normen
- Ermüdungsrelevante Konstruktion mit außergewöhnlichen Schwingbreiten führte zu erhöhtem Planungsaufwand sowie erhöhten Anforderungen an Material, Konzeption und Ausführung (Anwendungsgrenze der quasistatischen Tragwerksauslegung)
- Entwicklung diverser Sonderlösungen (Knotenelemente, Schnittstellen zu Aktorik und Fassade)
- Erforderliches Monitoring-/Wartungskonzept unter Zuhilfenahme externer Fachplaner
- Zusammenarbeit zwischen Stahlbau und Maschinenbau stellt für den Stahlbauer ungewöhnlichen Abstimmungsbedarf bzgl. geometrischer Schnittstellen, Maßtoleranzen, Bauzeiten und Logistik dar

Sonderfall Forschungs-/Testgebäude

- Kompromissbildung zwischen normgerechter Auslegung, gewünschter großer Auslenkung (Steifigkeit) und hoher Lastspielzahl
- undefiniertes Lastkollektiv bzw. undefinierte Testszenarien erschweren zielgerichtete Auslegung von Komponenten
- Erhöhte Anforderungen an die Gründung (Fundamente) aufgrund dynamischer Anregung und wechselnde Vorgaben von Seiten des Bodengutachtens
- Kenntnisse bzgl. Herstell- bzw. Lieferbarkeit unüblicher Halbzeuge übertraf typisches Praxiswissen

Planungsprozess

- Auf mehrere Disziplinen verteilter Gesamtüberblick bzw. verteiltes Systemverständnis, sodass Auswirkungen diskutierter Änderungen nicht unmittelbar von Einzelnen erfasst werden konnten
- Zeitlich knapp bemessene Entwurfsphase für das adaptive System bzw. die nachträgliche Integration der Aktorik führte zu vielen Iterationen
- Schwerpunkte der Planung und Iterationen waren nicht konform mit Leistungsphasen der HOAI
- Zielgerichtete Vorgehensweise zur Planung adaptiver Tragwerke war nicht bekannt
- Planung erforderte neue Aktivitäten mit ursprünglich schwer prognostizierbarem Aufwand
- Im Vergleich zur konventionellen Planung erwiesen sich neue sowie teilweise undefinierte Schnittstellen und unerwartete Abhängigkeiten von Ergebnissen
- Planungsfortschritt mit unterschiedlichen Detaillierungsstufen verschiedener Planungsbestandteile (Gründung, Tragwerk, hydraulisches System, Fassade bzw. zugehöriger Anschluss) führte zu Anpassungen von Schnittstellen und Nachträgen

<p>Zeitdruck und -planung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Termindruck mündete in diversen Iterationen und Nachträgen, z. B. bei der Gründung, da nach Beginn der Bauausführung und nach Anpassung von Lasten höhere Anforderungen hervorgingen • Zeitplanung mit iterativen Prognosen und letztendlich bedeutend längerem Planungszeitraum aufgrund diverser neuer, unerwarteter bzw. erweiterter Aktivitäten mit schwer prognostizierbarem bzw. unterschätztem Aufwand • Eingeschobener Prototypenbau erforderte zusätzlichen Planungs- und Realisierungsaufwand • Fehlende Meilensteine mit definierten Zielterminen
<p>Anforderungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anspruchsvolles Anforderungsprofil hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Gebäudes • Wechselnde sowie unbekannte bzw. nicht erfasste Anforderungen • Keine Priorisierung von Anforderungen, z. B. hinsichtlich der Zuordnung von Budget • Kein konsequent durchgeführtes Anforderungsmanagement
<p>Entscheidungsfindung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spät getroffene Entscheidungen führten zu parallelen Lösungen • Teilweise unklare Rollenverteilung bei Verantwortlichkeiten • Planung auf Grundlage getroffener Annahmen bzw. flexiblen Eigenschaften (z. B. Austauschbarkeit von Tragwerkselementen, modularisierter Aufbau)
<p>Interdisziplinarität</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unterschiedlich bevorzugte Vorgehensweisen in den Disziplinen (integratives serielles bzw. kooperatives, paralleles Vorgehen) • Fehlende Erfahrung in der Baupraxis bei „neuen“ Disziplinen • Offene Fragen bzgl. Verantwortung/Haftung (z. B. für Statik relevante Komponenten der Aktorik)
<p>Daten- und Informationsaustausch</p> <ul style="list-style-type: none"> • Große Diskussionsrunden, die sich nicht für alle Beteiligten produktiv gestalteten • Unregelmäßiger, zeitlich diskret erfolgter Datenaustausch • Unterschiedliche Datentypen, z. B. 2D- (Architektur und Tragwerksplanung) und 3D-CAD-Modelle (Maschinenbau) • Relevanz von Informationen wurde von Disziplinen unterschiedlich gewertet
<p>Persönliches</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mehrfache Personalwechsel • Verbesserungsfähige Kommunikation • Fehlendes Teambuilding
<p><i>Legende: hervorgehoben sind Punkte, in deren Kontext im Rahmen der Arbeit für zukünftige Planungen zumindest im Ansatz ein unterstützender Beitrag entwickelt wird</i></p>

Tabelle 5.2: Ermittelte Herausforderungen bei der Planung des Experimentalhochhauses mit Fokus auf das adaptive Tragwerk

6 Anforderungen an den Planungsprozess und die methodische Unterstützung

Zur zielgerichteten Entwicklung einer methodischen Unterstützung bzw. eines Planungsprozesses ist es erforderlich, sich die Anforderungen zu vergegenwärtigen, deren Erfüllung einer bedarfsgerechten Lösung zugrunde gelegt ist [vgl. BENDER05, S. 21]. Für die Erarbeitung von Vorgehensweisen und Methodiken existieren zahlreiche allgemeine Anforderungen, die Crostack [CROSTACK18, S. 22 ff.] als Ergebnis einer Literaturrecherche zusammenfasst. Anforderungen wie diese gelten „global für alle Arten von Entwicklungsprozessen“ [BENDER05, S. 21]. Aufgrund deren Allgemeinheit sind für den vorliegenden Kontext anwendungsspezifisch Ergänzungen und inhaltliche Abgrenzungen zu ermitteln, auf die weiter eingegangen wird. Das Kapitel stellt zunächst die Vorgehensweise zur Ermittlung der Anforderungen vor und verweist dabei auf die Inhalte folgender Teilkapitel.

6.1 Vorgehensweise zur Erhebung der Anforderungen

Für die Erhebung der Anforderungen wird ein zweistufiges Vorgehen angewandt. Zunächst leitet Abschnitt 6.2 ausgehend von den in Kapitel 5.3 vorgestellten Herausforderungen den Unterstützungsbedarf ab. Das Ziel dabei ist die Ermittlung, welche Schritte, Aktivitäten, Probleme, d. h. „was“ konkret durch weitere Ergebnisse dieser Arbeit zu unterstützen ist. In Abschnitt 6.3 folgt als zweiter Schritt die Definition, „wie“ diese zu unterstützen sind. Dabei wird der Beitrag von Honold et al. [HONOLD19A] aufgegriffen, in dem neben der vorgestellten prozessualen Darstellung des Planungsvorgehens (vgl. Kapitel 5.1) relevante Erkenntnisse, ähnlich den vorgestellten Herausforderungen, mit Fokus auf den Entwurf dokumentiert wurden. Diese Erkenntnisse werden innerhalb des Beitrags in Anforderungen an einen zukünftigen integralen Entwurf von adaptiven Tragwerken überführt und gruppiert [HONOLD19A, S. 8]. Für die Betrachtung des gesamten Planungsprozesses ist das Set an Anforderungen zu erweitern. Im Wesentlichen beruhen alle Anforderungen aus Erkenntnissen der intensiven Zusammenarbeit zwischen den Projektbeteiligten seit Beginn der Projektbeantragung, Diskussionen, Workshops, Vortragsreihen und der sonstigen Projektarbeit mit Beteiligten unterschiedlicher Fachrichtungen des Forschungsprojekts sowie mit Beteiligten der mehrjährigen Planung des Experimentalhochhaus. Abschließend werden in Abschnitt 6.4 Ergebnisse der diesbezüglichen Evaluationsgespräche erläutert.

6.2 Identifikation des Unterstützungsbedarfs

Zur Ableitung der konkret zu unterstützenden Aktivitäten dient Tabelle 6.1, die in der ersten Spalte Herausforderungen auflistet, die sich im Sinne der Zielsetzung der Arbeit methodisch unterstützen lassen. Unterschieden wird zwischen bereits bei der Planung ermittelten, „rückblickend“ festgestellte Herausforderungen im oberen Teil und zukünftige Planungsprojekte adaptiver Gebäude betreffende, „vorausschauend“ identifizierte Herausforderungen im unteren Teil. Zu ersteren gehören in zusammengefasster Form die blau gekennzeichneten Aufzählungspunkte aus Tabelle 5.2. Letztere sind Herausforderungen, die im Rahmen der Planung des Experimentalhochhauses aufgrund der bisherigen Randbedingungen des Forschungsprojekts nicht aufkamen, aber aus Sicht des Forschungsteams zukünftig auftreten werden.

	Herausforderung	Abgeleiteter Unterstützungsbedarf	Ergebnis
Rückblickend	<ul style="list-style-type: none"> • Unbekannte zielgerichtete Vorgehensweise zur Planung adaptiver Tragwerksysteme • Unterschiedlich bevorzugte Vorgehensweisen in den beteiligten Disziplinen • undefinierte Schnittstellen und unerwartete Abhängigkeiten von Ergebnissen • Auf mehrere Disziplinen verteilter Gesamtüberblick 	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung eines Planungsprozesses für adaptive Tragwerksysteme 	Kapitel 8.1 und 8.2
	<ul style="list-style-type: none"> • Methoden mussten zunächst erarbeitet und eingeführt werden • Neue Aktivitäten mit ursprünglich schwer prognostizierbarem Aufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Veranschaulichung des abstrahierten Vorgehens anhand eines Vorgehensmodells 	Kapitel 8.6
	<ul style="list-style-type: none"> • Wechselnde, unbekannte und nicht erfasste Anforderungen, keine Priorisierung, kein Anforderungsmanagement 	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung eines Methodenbaukastens • Bereitstellung von Methoden der Produktentwicklung 	Kapitel 7.2 bis 7.4 Kapitel 7.5
Vorausschauend	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende Unterstützung zur systematischen Reduktion von Umweltwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Integration des Methodenbaukastens in den Prozess 	Kap. 8.3.1 und 8.3.2
	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende Unterstützung zur systematischen Entwicklung des Sicherheitskonzepts adaptiver Tragwerke während der Planung 	<ul style="list-style-type: none"> • Transfer des Requirements Engineerings 	Kapitel 8.4
	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlender Ansatz zur Bewertung und dem Vergleich von Tragwerkskonzepten 	<ul style="list-style-type: none"> • Integration der LCA in die Planungsphasen • Integration der Entwicklung des Sicherheitskonzepts in den Planungsprozess 	Kap. 8.3.3 Kap. 8.3.4
		<ul style="list-style-type: none"> • Multidisziplinärer Bewertungsansatz von Tragwerkskonzepten 	Kapitel 8.5

Tabelle 6.1: Ableitung des Unterstützungsbedarfs

Die zweite Spalte beinhaltet den von den Herausforderungen abgeleiteten Unterstützungsbedarf in Form des Prozesses, eines Vorgehensmodells sowie in den Prozess integrierender Methoden oder Werkzeuge. Die Ansätze entstanden bei der disziplinenübergreifenden Suche nach Lösungen für die Herausforderungen oder wurden aufgrund

ähnlicher Vorgehensweisen aus der Produktentwicklung übertragen und sind jeweils weiter zu konkretisieren. Dazu verweist die dritte Spalte auf die nachfolgenden Kapitel, in denen die jeweiligen Module einschließlich deren Hintergründe vorgestellt werden.

6.3 Definition und Klassifikation der Anforderungen

Aufbauend auf der Beantwortung, „was“ durch die Ergebnisse der Arbeit zu unterstützen ist, folgt im Rahmen dieses Teilkapitels die Beantwortung nach dem „wie“. Tabelle 6.2 beinhaltet die resultierende Anforderungsspezifikation an den zu entwickelnden Planungsprozess und der zugehörigen methodischen Unterstützung. Als Basis dient das in der Tabelle gekennzeichnete Set an Anforderungen, das an ein Vorgehen zum Entwurf adaptiver Tragwerke aufgestellt wurde [HONOLD19A, S. 8] und in Anforderungen an das prozessuale und interdisziplinäre Vorgehen sowie in Anforderungen an die Methodenanwendung unterteilt ist. Diese Gliederung wird im Rahmen der Arbeit übernommen und mit Anforderungen für einen Fokus auf den gesamten Planungsprozess ergänzt. Auch die Ableitung der Ergänzungen erfolgte auf Basis der während der Planung gewonnenen Erkenntnisse. Nachfolgend werden die Anforderungen kurz erläutert.

Die Anforderungen an das prozessuale Vorgehen dienen dazu, den Planungsprozess hinsichtlich einer zielgerichteten und strukturierten Vorgehensweise zu prägen. Durch die Abgrenzung von Prozessschritten soll das Planungsvorgehen transparent und der Planungsfortschritt operationalisiert werden (Anforderung 1). Für die durch die Bauweise bedingte Erweiterung des Planungsvorgehens und einhergehender neuer Schwerpunkte (interdisziplinäre Konzeptphase) ist das Vorgehen von den Phasen der HOAI zu entkoppeln. Fragen zur Honorierung der Planungsleistungen sind von dieser Arbeit losgelöst zu beantworten. Das Aufgreifen der bisherigen Vorgehensweise soll das Verständnis bzw. eine Eingewöhnung bestmöglich unterstützen und dadurch die Akzeptanz für ein Planungsvorgehen mit erweiterten bzw. neuen Tätigkeitsfeldern und Schwerpunkten steigern (Anf. 2). Die Planung des Experimentalhochhauses hat erwiesen, dass adaptive Funktionalitäten im Planungsvorgehen eine frühzeitige und tiefgehende Betrachtung erfordern (Anf. 3). Diese beruht insbesondere auf der disziplinenübergreifenden Definition und Berücksichtigung von Anforderungen (Anf. 4) und muss für die strukturierte Lösungssuche im Rahmen einer iterativen Konzeptphase (Anf. 5) erfolgen. Die Abbildung des Planungsprozesses als Bestandteil des Gebäudelebenszyklus von der Planung bis zum Rückbau vergegenwärtigt die Bedeutung der späteren Nutzungs- bzw. Betriebsphase sowie des Rückbaus und ermöglicht die Ableitung aus späteren Phasen resultierender

Anforderungen und Abhängigkeiten (Anf. 6). Um das Erreichen der Planungsschritte (vgl. Anf. 1) zu unterstützen, ist das Potenzial von Empfehlungen für Methodenanwendungen bzw. methodische Werkzeuge durch den Prozess auszuschöpfen (Anf. 7).

Anforderungen an das prozessuale Vorgehen
1. Die Prozessschritte und jeweilige Aktivitäten zur Planung adaptiver Tragwerkssysteme sind vollständig und redundanzfrei abzugrenzen.
2. Das Vorgehen ist von den Leistungsphasen der HOAI zu entkoppeln, jedoch sollen bisherige Planungsgewohnheiten berücksichtigt bleiben.
3. Der Entwurf bzw. das Erarbeiten eines Tragwerkskonzepts muss unmittelbar unter Berücksichtigung möglicher adaptiver Funktionalitäten bzw. der Integration adaptiver Elemente erfolgen. *
4. Anforderungen sind frühzeitig interdisziplinär zu definieren und anschließend ist für unvermeidbare Änderungen ein konsequentes Anforderungsmanagement vorzusehen. *
5. Im Prozess sind während des Entwurfsstadiums Zeiträume für iterative Tätigkeiten mit anschließender Synthese im Sinne einer Konzeptphase gezielt einzuräumen. *
6. Für die Berücksichtigung bzw. Rückkopplung von Anforderungen aus dem gesamten Lebenszyklus muss der Prozess die Zeitspanne von der Planung bis zum Rückbau abbilden.
7. Das prozessuale Vorgehen ist durch Vorschläge bezüglich geeigneter Methodenanwendungen zu unterstützen.
Anforderungen an das interdisziplinäre Vorgehen
8. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit muss mit der Bedarfserhebung des Entwurfsprozesses beginnen. *
9. Aufgabenbereiche und Zuständigkeiten sind den Planungsbeteiligten klar zuzuordnen und die Schnittstellen zu kennzeichnen. *
10. Der Informations- und Datenaustausch unter den beteiligten Disziplinen ist mit festgelegten Intervallen bzw. Zeitpunkten sicherzustellen, beispielsweise mit Meilensteinen. *
11. Die Nutzung gemeinsamer Modelle wie CAD- oder Simulationsmodelle ist anzustreben. *
Anforderungen an die Methodenanwendungen
12. Bewährte Methoden bei der Planung des Experimentalhochhauses sind bei der Erarbeitung der methodischen Unterstützung zu berücksichtigen. *
13. Weitere etablierte oder im Forschungsstadium befindliche Methoden zur Unterstützung des Prozesses (z. B. Bewertung der Umweltwirkungen von Entwurfsvarianten, Sicherheits- und Ausfallkonzepte, digitale Planungs- und Entwurfswerkzeuge für adaptive Systeme) sind in den Prozess zu integrieren. *
14. Bewährte Methoden sind in Form eines Methodenbaukastens zu sammeln und mit dem Prozessmodell zu verknüpfen. *
* vgl. [HONOLD19A, S. 8]

Tabelle 6.2: Anforderungen an die zu entwickelnde methodische Unterstützung

Die Anforderungen an das interdisziplinäre Vorgehen haben das Ziel, die Zusammenarbeit der Disziplinen durch das gezielte Einbinden jeweiliger Kompetenzen zu stärken. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit ist unmittelbar ab dem Beginn des Entwurfs anzustreben, um den Architekten mit Aussagen zum Lösungsraum bzw. der Machbarkeit adaptiver Systeme frühzeitig zu unterstützen (Anf. 8). Um die Kompetenzen den jeweiligen Disziplinen zuzuordnen und dadurch Verantwortungsbereiche zu definieren, sind den Disziplinen Aufgaben bzw. Aktivitäten zuzuweisen und der Austausch von Teilergebnissen ist durch das Aufzeigen von Schnittstellen zu veranschaulichen (Anf. 9). Die Zusammenarbeit von Planungsbeteiligten setzt eine einheitliche Kenntnis des Planungs-

stands voraus. Dafür ist ein Informations- und Datenaustausch in geeigneten Intervallen (Anf. 10) sicherzustellen sowie die gemeinsame Nutzung von Daten bzw. Modelle, wie z. B. CAD- und Simulationsmodelle, anzustreben (Anf. 11).

Die Anforderungen an das methodische Vorgehen bezwecken eine Unterstützung des prozessualen und des interdisziplinären Vorgehens. Als Basis dienen die vorhandenen Methoden, die sich bei der Planung des Experimentalhochhauses bereits bewährt haben (Anf. 12). Dieses Set an Methoden ist durch weitere bereits etablierte, derzeit im Entwicklungsstadium befindliche sowie zukünftig noch zu erarbeitende Methoden aller beteiligten Disziplinen zu erweitern (Anf. 13). Zur systematischen Sammlung dieser Methoden ist ein Methodenbaukasten (vgl. Kapitel 2.1.3) zu entwickeln, um längerfristig den aktuellen Stand von Methoden zur Planung adaptiver Tragwerke zu repräsentieren (Anf. 14). Eine Verknüpfung des Methodenbaukastens mit dem Prozessmodell soll mit Hilfe von Verweisen aus dem Planungsprozess zu geeigneten Zeitpunkten die Empfehlung passender Methoden aussprechen (vgl. Anf. 7). Dadurch wird abgebildet, in welcher Phase bei welcher Aktivität für welche Disziplin sich welche Methode eignet.

Im Hinblick auf die in Kapitel 2.5.2 vorgenommene Klassifikation von Prozessmodellen zielen die Anforderungen auf die Erarbeitung eines kombinierten, problemorientierten und präskriptiven Modells. Diese Kombination ist dadurch begründet, dass die Beschreibung, von Phasen und jeweiligen Aktivitäten (kombiniertes Modell) ausgehend, von einem zu Beginn des Prozesses zu analysierendem und zu lösendem Problem (problemorientiertes Modell) sowie einem in der Praxis erfassten, anschließend idealisierten und optimierten Vorgehen (präskriptives Modell) gefordert wird.

Die Erläuterungen in Kapitel 5 und dieses Kapitels weisen darauf hin, welche Aktivitäten sich im Vergleich zur konventionellen Planung gemäß HOAI zum Teil wesentlich erweitern, welche neuen Schnittstellen sich ergeben und wo identifizierte Herausforderungen liegen. Durch die Betrachtung veränderter Randbedingungen und Möglichkeiten des architektonischen Entwurfs in separaten Forschungsarbeiten (vgl. Kapitel 1.2) resultieren für die vorliegende Zielsetzung zwei Punkte als Fazit:

- Im Wesentlichen erfordern die Aktivitäten Unterstützung, die sich durch die neue Zusammenarbeit mit den Disziplinen Systemdynamik und Maschinenbau ergeben bzw. erweitern.
- Eine Häufung an Herausforderungen lässt sich bei den Aktivitäten zur Bestimmung des Lösungsraums und der anknüpfenden Lösungssuche feststellen. Beide sind der Konzeptfindung zuzuordnen.

Gemäß den Argumenten für die integrale Planung (Kapitel 2.3.2) sowie durch das Festlegen wesentlicher Eigenschaften (vgl. Kapitel 2.3.4) hat die frühe Phase bereits hohe Relevanz. Im Kontext adaptiver Systeme gewinnt dieses Planungsstadium zusätzliche Bedeutung, da heute nicht geläufige technische Konzepte zu erarbeiten sind und dabei eine starke Abhängigkeit zwischen den Disziplinen besteht, die jeweils notwendige Kompetenzen einbringen. Um diesen Aspekten gerecht zu werden, wird als grundlegender Bestandteil des Planungsprozesses der Bedarf an einer interdisziplinären Konzeptphase erkannt. Passend zu dieser Feststellung lässt sich - den Erfahrungswerten aus dem vorangegangenen Methodentransfer in das Bauwesen folgend - die frühe Phase „sehr gut“ unterstützen [ERDELL06, S. 104].

6.4 Evaluation der Anforderungen

Die Evaluationsergebnisse zur Anforderungsdefinition sind in zwei Abschnitte gegliedert. Zunächst werden in Abschnitt 6.4.1 die Zielsetzung und die gewählte Vorgehensweise und darauffolgend in Abschnitt 6.4.2 die gewonnenen Ergebnisse zusammengefasst.

6.4.1 Zielsetzung und Vorgehen der Evaluation

Die Evaluation der Anforderungen dient dazu, eine weitestgehend objektive Grundlage für die weitere Ausarbeitung der zu entwickelnden Unterstützung sicherzustellen. Ein Konsens innerhalb der Evaluationspartner hinsichtlich der Definition der Anforderungen hat den Zweck, die Unterstützung bedarfsgerecht zu entwickeln und deren Akzeptanz disziplinenübergreifend zu fördern. Zur Erarbeitung der Grundlage wurde den Evaluationspartnern (vgl. Kapitel 4.4) die Anforderungsdefinition von Tabelle 6.2 vorgestellt. Um eine kritische Bewertung zu erhalten, lag den Evaluationspartnern (neben dem Evaluationsbogen) ein Formblatt vor, auf dem für jede der 14 Anforderungen das Zutreffen (ja/nein) aus der jeweiligen Expertensicht anzugeben war. Die Anforderungen, die aus jeweiliger Sicht eine besonders hohe Relevanz aufweisen, waren zusätzlich zu kennzeichnen. Das Formblatt ist Bestandteil von Anhang A.9.

6.4.2 Diskussion der Evaluationsergebnisse

Die Evaluationspartner teilten (unabhängig voneinander) mit, dass die aufgeführten Anforderungen für die Entwicklung einer methodischen Unterstützung zutreffen und dafür „eine gute Grundlage“ darstellen. Aus der Auswertung des Formblatts ging hervor, dass insbesondere der Anforderung 3 (unmittelbare Zusammenarbeit), 4 (interdisziplinäre An-

forderungsdefinition und Requirements Engineering) und 10 (Sicherstellung des Informations- und Datenaustauschs) eine hohe Relevanz zugeordnet wird.

Tiefergehend diskutiert wurde Anforderung 12, inwiefern sich bei der Planung des Experimentalhochhauses bewährte Methoden auf zukünftige Planungsprojekte übertragen lassen. Die Methoden haben bei der ersten Anwendung im Forschungsumfeld sowie den berücksichtigten Randbedingungen zu den gewünschten Ergebnissen geführt, eine generelle Übertragbarkeit sei erst durch weitere Anwendungen zu bestätigen.

Die Evaluationspartner formulierten als Fazit der Diskussionen nachfolgende Aussagen. Die umfangreiche Aufstellung der Anforderungen deuten auf eine Auseinandersetzung mit dem Problem hin. Auf die Frage 13 des Evaluationsbogens (siehe Anhang A.5), inwiefern der identifizierte Unterstützungsbedarf mit dem jeweiligen Bedarf bzw. den Wünschen der Evaluationspartner hinsichtlich einer methodischen Unterstützung des Planungsprozesses für die zukünftige Planung adaptiver Tragwerke übereinstimmt, wurde zum Zeitpunkt der Erfassung kein zusätzlicher Unterstützungsbedarf identifiziert, sondern die vorgestellte Auflistung bestätigt. Mehrere Evaluationspartner wiesen auf die bisher nicht fokussierte, aber in der Baupraxis während der Planung typische Interaktion von Bauherren und Nutzern hin. Ansonsten wurden von allen weiteren Evaluationspartnern auch keine zusätzlichen Anforderungen vorgeschlagen, sondern die Vollständigkeit bestätigt. Eine Rückmeldung betonte explizit die Abbildung von Anforderungen aus allen relevanten Disziplinen. Ein Evaluationspartner erkannte eine Fokussierung der Anforderungsdefinition auf das frühe Planungsstadium, welches gemäß Aussage eines anderen Evaluationspartners einen besonderen Nutzen zur späteren Beschreibung von Schnittstellen während der Planung liefert.

Der vorgestellte Unterstützungsbedarf sowie die Anforderungsdefinition an die methodische Unterstützung werden aufgrund der erläuterten Bewertung durch die Evaluationspartner als zutreffend, für das derzeitige Forschungsstadium vollständig und somit als geeignete Grundlage für die weiteren Entwicklungsschritte verstanden.

7 Methodenbaukasten für die Planung adaptiver Gebäude

Dieses Kapitel behandelt die Forschungsfrage 3, wie sich Methoden verschiedener Disziplinen für die Planung und Entwicklung adaptiver Gebäude zielgerichtet bereitstellen lassen. Einen anwendungsspezifischen Lösungsvorschlag in Form eines Methodenbaukastens erarbeiteten Honold et al. [HONOLD19C]. Außerdem wurde eine Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden [HONOLD19B] erstellt, die eine Auswahl solcher Methoden für interdisziplinäre Anwendungsfälle bzw. einen Transfer ins Bauwesen unterstützen soll. Dieses Kapitel greift beide Beiträge auf und stellt deren Ergebnisse in den Kontext dieser Arbeit. In Kapitel 7.1 wird der Ansatz und die Vorgehensweise beschrieben und auf die weiteren Teilkapitel verwiesen.

7.1 Vorgehensweise zur Erarbeitung des Methodenbaukastens

Die Entwicklung des Methodenbaukastens orientiert sich an den untergeordneten Forschungsfragen in Kapitel 4.2. Hinsichtlich der Definition in Kapitel 2.1.3 ist der Methodenbaukasten eine (auf vielseitige Weise realisierbare) Sammlung an Methoden und eignet sich somit für die gegebene Problemstellung. Methodenbaukästen bestehen für gewöhnlich aus Steckbriefen zur Beschreibung der Methoden und einem Auswahlssystem [vgl. EHRENSPIEL17, S. 434 f.]. Zunächst wird erläutert, wie sich Methoden mit Hilfe eines Methodenbaukastens erfassen lassen. Wie Auswahlssysteme realisiert werden können, wird von Honold et al. [HONOLD19C] anhand einer Literaturrecherche ermittelt und am Beispiel von fünf Lösungsansätzen aufbereitet.

Zur Auswahl und Ausarbeitung eines Konzepts für den Kontext der Arbeit werden eigene Ziele und Anforderungen an den Methodenbaukasten definiert [vgl. HONOLD19B, S. 171] und in Abschnitt 7.2 aufgegriffen. Um die entwickelten und zukünftig existierenden Methoden bestmöglich in den Planungsprozess zu integrieren, sind diese zunächst zu sammeln, zu erfassen und zu kategorisieren [vgl. HONOLD19B, S. 171]. Abschnitt 7.3 stellt diesbezüglich einen Steckbrief als Vorschlag zur Erfassung der Methoden vor. Das Auswahlssystem ist Bestandteil von Abschnitt 7.4 und geht als Favorit aus einer für diesen Kontext vorgenommenen Bewertung [HONOLD19C, S. 177] hervor.

Um das Potenzial von Methoden der Produktentwicklung bei der Planung adaptiver Gebäude zu prüfen bzw. zu nutzen, sind auch diese Methoden zielgerichtet bereitzustellen. Die Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden [HONOLD19B] bereitet für die-

sen Zweck die Vielzahl und Vielfalt dieser Methoden grafisch in Form eines alternativen Auswahlsystems [vgl. HONOLD19C, S. 173] auf und wird in Abschnitt 7.5 vorgestellt.

Da gemäß Anforderungsdefinition aus Kapitel 6.3 der Methodenbaukasten mit dem zu erarbeitenden Prozess zu verknüpfen ist, werden in Abschnitt 7.6 nur die Evaluationsergebnisse bezüglich der Anforderungen an den Methodenbaukasten und der Akzeptanz der Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden vorgestellt. Die Evaluation zum ausgearbeiteten und verknüpften Methodenbaukasten beschreibt Kapitel 8.7.

7.2 Ziel- und Anforderungsdefinition für den Methodenbaukasten

Für die interdisziplinäre Zusammenarbeit ist sicherzustellen, dass Methoden und Werkzeuge deren Anwendern zur Verfügung stehen und von diesen effizient eingesetzt werden können [EHRENSPIEL17, S. 237]. Bei der Planung des Experimentalhochhauses bestätigte sich, dass auch die Kenntnis über die Methoden fachfremder Beteiligter notwendig ist. Beispielsweise werden Aktivitäten und Ergebnisse der bislang fachfremden Disziplinen, wie die Bestimmung geeigneter Akteurpositionen oder die Auslegung von Akteursystemen, transparent. Allerdings vermissten auch Vertreter der neuen Disziplinen Beschreibungen existierender Vorgehensweisen im Bauwesen, um u. a. Zwischenergebnisse hinsichtlich des Reifegrads einordnen und auf diesen aufbauen zu können. Auch für die Koordination der Planungsleistungen sind Informationen zu den Methoden essenziell. Diese betreffen die notwendigen Vorarbeiten, zu treffende Annahmen, erwartete Ergebnisse, Formate der Ergebnisse sowie benötigte Aufwände und ermöglichen die Definition von Schnittstellen der (interdisziplinären) Zusammenarbeit. Ein zielgerichtetes Vorgehen setzt folglich die Planbarkeit der Methodenanwendungen voraus. Mit der Kenntnis über den Zweck einer Methode können deren Potenziale optimal genutzt werden.

Diese Aufgaben sollen durch einen spezifisch entwickelten Methodenbaukasten erfüllt werden, für dessen Erarbeitung eigens definierte Anforderungen zugrunde zu legen sind. Als Grundlage greifen Honold et al. [HONOLD19C, S. 174] auf „allgemeine Anforderungen“ an Methodenbaukästen nach Ehrlenspiel und Meerkamm [EHRENSPIEL17, S. 435] zurück. Der Methodenbaukasten

1. ... soll die Verknüpfung von Aufgaben und zweckmäßigen Methoden angeben.
2. ... soll Methoden identifizierbar beschreiben.
3. ... soll Auswahlkriterien und Hinweise für den Methodeneinsatz geben.
4. ... soll auf ergänzende Informationen zur Methode sowie zum Erlernen hinweisen.

5. ... soll erweiterbar und aktualisierbar sein.

Für die anwendungsspezifische Entwicklung des Methodenbaukastens zur Planung adaptiver Gebäude sind ergänzende Anforderungen erforderlich, die Honold et al. als sogenannte „problemspezifische Anforderungen“ definieren [HONOLD19C, S. 175] und während eines interdisziplinären Workshops mit Planungsbeteiligten erarbeiteten [HONOLD19C, S. 174]. Der Methodenbaukasten soll ...

6. ... die Planung von Methodenanwendungen unterstützen, zum Beispiel durch die Angabe relevanter Schnittstellen und erforderlicher Aufwände.
7. ... Methoden den jeweiligen Disziplinen zuordnen.
8. ... Methoden jeweiligen Komponenten (z. B. Strukturen bzw. Hüllen) zuordnen.
9. ... auf Abhängigkeiten von anderen Methodenanwendungen hinweisen.
10. ... die Sammlung an Methoden strukturiert und übersichtlich darstellen.

Für eine ausführliche Definition der Anforderungen wird auf Honold et al. [HONOLD19C, S. 174 f.] verwiesen.

7.3 Erfassung der Methoden mit Steckbriefen

Zur Erfassung der Methoden mit allen relevanten Informationen fand im Forschungsprojekt ein von Honold et al. [HONOLD19C, S. 175] vorgestellter Steckbrief Anwendung. Der Aufbau des Steckbriefs basiert auf Ergebnissen einer durchgeführten Literaturrecherche [HONOLD19C, S. 171 ff.] sowie der Anforderungsdefinition (Abschnitt 7.2). Als Anwendungsbeispiel stellt Bild 7.1 einen ausgefüllten Steckbrief dar, welcher den in Kapitel 8.4 beschriebenen Requirements Engineering Ansatz beschreibt.

Im Allgemeinen beinhaltet der Steckbrief in der linken Spalte Informationen zur Anwendung, zu denen neben einer knappen Methodenbeschreibung auch Angaben zum Ergebnis(-format) sowie zu erforderlichen Vorarbeiten und Ressourcen zählen. Die rechte Spalte unterstützt die Kategorisierung und Auswahl durch Angaben zu zugehörigen Disziplinen bzw. Fachbereichen, geeigneten Planungsphasen sowie zum typischen Zeitaufwand. Zur Steigerung des Wiedererkennungswerts der Methode dient ein Feld für eine individuelle markante Visualisierung. Da der Steckbrief nicht die vollständige Aneignung der Methode ermöglichen kann, empfiehlt sich ein Verweis auf weiterführende Literatur. [HONOLD19C, S. 176]

Während eines Workshops wurde der Steckbrief zur Erfassung von ca. 30 neuentwickelten bzw. transferierten Methoden von beteiligten Forschern selbsterklärend eingesetzt

[HONOLD19C, S. 176]. Steckbriefe von im Rahmen dieser Arbeit neuentwickelten bzw. transferierten Methoden sind in Anhang A.10 gesammelt.


Requirements Engineering <small>Bezeichnung der Methode</small>		SFB 1244 <small>Methodenbaukasten</small>
Analysemethode bzw. Soll-/Ist-Abgleich <small>Methodentyp</small>	Honold, A01, IKTD <small>Name, Teilprojekt, Institut</small>	
Ziel des Requirements Engineerings (RE) ist in diesem Kontext das Erlangen und Pflegen eines gemeinsamen Verständnisses über das zu planende bzw. entwickelnde adaptive System innerhalb des interdisziplinären Planungsteams. Das RE gliedert sich in die Phasen Aufgabenklärung (Erheben, Analysieren sowie Dokumentieren von Anforderungen) sowie das Anforderungsmanagement (Freigeben, Versionieren, Ändern und Rückverfolgen von Anforderungen). <small>Methodenbeschreibung (Zweck und Funktion)</small>		Anforderungsspezifikation  z. B. Anforderungsliste
Anforderungsspezifikation (z. B. in Form einer Bedarfs-/Anforderungsliste), die sämtliche an das Ergebnis gestellten Anforderungen beinhaltet, fortwährend aktualisiert wird und allen Planungsbeteiligten vorliegt. <small>Ergebnis (Ausgangsinformationen und Ergebnisform)</small>	Visualisierung	Projektmanagement <small>Verantwortliche Disziplin/Fachbereich</small>
Aufgabenstellung bzw. Projektziele, weitere Randbedingungen <small>Benötigte Vorarbeit/Eingangsinformationen</small>	Bedarfserhebung bis Realisierung <small>Phase/Arbeitsabschnitt</small>	
Alle Stakeholder und Vertreter aus den beteiligten Fachdisziplinen <small>Erforderliche Ressourcen, z. B. weiteres (Fach-)Personal, Software etc.</small>	hoch (100 bis 150 h) <small>Zeitlicher Aufwand</small>	
RE kann datenbankgestützt angewandt werden <small>Hinweise/Sonstiges (z. B. erforderliche Annahmen)</small>	[Honold et al. 2017] <small>Literaturverweis</small>	

Bild 7.1: Steckbrief zur Erfassung von Methoden [vgl. HONOLD19B, S. 175]

7.4 Ermittlung eines geeigneten Darstellungs- und Auswahlkonzepts

Um die verfügbaren bzw. erfassten Methoden übersichtlich darstellen und eine bedarfsgerechte Auswahl unterstützen zu können sowie die geforderte Planbarkeit der Methoden zu ermöglichen und eine Kopplung mit dem zu entwickelnden Planungsprozess zu realisieren, wird ein Lösungsansatz benötigt, der diese funktionalen Anforderungen vereint erfüllt. Zur Entwicklung dieser Lösung greifen Honold et al. [HONOLD19C] Ergebnisse einer Literaturrecherche zu bestehenden Methodenbaukästen auf. Gefundene Ansätze wurden für eine prinzipielle Anwendbarkeit soweit aufbereitet, dass fünf Konzepte eine Gegenüberstellung und Bewertung hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen (vgl. Abschnitt 7.2) zulassen [HONOLD19C, S. 173 f.]. Die Konzepte sind in Anhang A.11 aufgelistet. Aus der Bewertung geht das als Methodendiagramm bezeichnete Konzept mit dem höchsten Erfüllungsgrad hervor und erweist im Grundsatz eine Erfüllung aller Anforderungen [HONOLD19C, S. 177]. In Bild 7.2 wird schematisch der Aufbau dieses Konzepts veranschaulicht.

Die Grundidee entstammt einer Darstellung der Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221 1993, S. 9] und resultiert aus der Anforderung, dass der Methodenbaukasten und der Prozess eine Kopplung aufweisen. Indem die zu entwickelnde generische Prozessdarstellung (vgl. Kapitel 8.2) Eintragungen für potenzielle Methodenanwendungen zu jeweils geeigneten Zeitpunkten erhält, wird der Methodenbaukasten unmittelbar in einen Prozess integriert, der als Voraussetzung ein schrittweises Vorgehen abbilden muss.

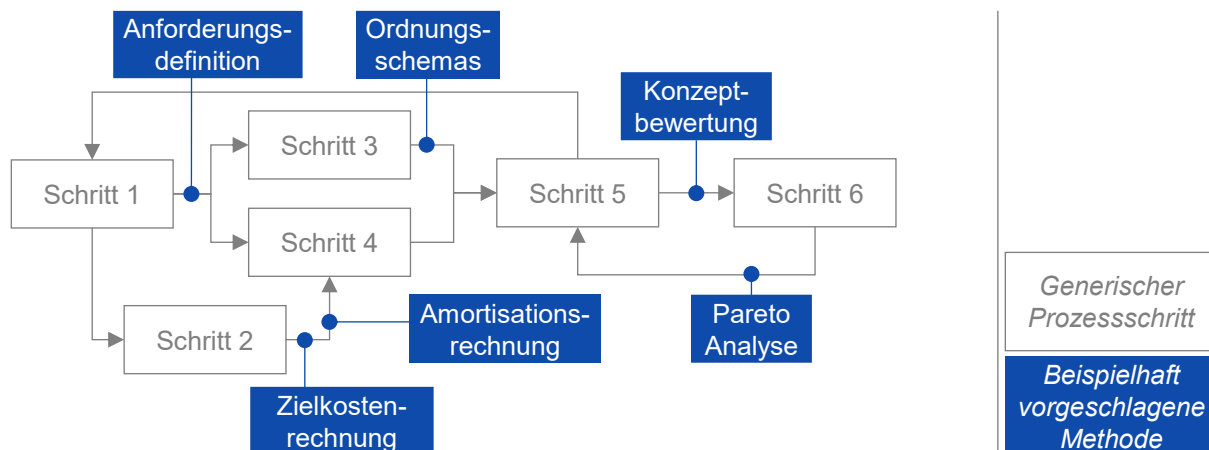


Bild 7.2: Darstellungskonzept eines Methodenbaukastens nach Honold et al. [HONOLD19C, S. 173]

Die Planbarkeit des Vorgehens wird dadurch unterstützt, dass geeignete Methoden nicht mehr aus einem gegebenenfalls umfangreichen Methodenpool auszuwählen sind. Die Methoden sind als Empfehlung zu verstehen und überbrücken das operative Vorgehen vom vorhergehenden zum nachfolgenden Arbeitsstand innerhalb des Prozesses. Das Konzept repräsentiert folglich eine Übersicht, aus der für die Methodenanwendung notwendige Vorarbeiten, Schnittstellen und Abhängigkeiten zu anderen Aktivitäten ersichtlich sind, Zeitpunkte anzustrebender (Zwischen-) Ergebnisse hervorgehen und somit die Planung des Gesamtvorgehens unterstützt wird. Mehrere Methoden an gleicher Position sind im Sinne eines Methodenbaukastens als jeweils alternative bzw. sich ergänzende Angebote zu verstehen.

Im Vergleich zu weiteren untersuchten Konzepten ist eine Vorauswahl von Methoden für definierte Zeitpunkte im Prozess vorausgesetzt. Allgemein anwendbare Methoden, die sich für typische, wiederkehrende Situationen eignen, müssen separat gesammelt werden [HONOLD19C, S. 173] oder sind bereits Bestandteil in der im nachfolgenden Abschnitt 7.5 vorgestellten Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden.

Die Vorstellung des ausgearbeiteten Methodenbaukastens erfordert einen ebenfalls ausgearbeiteten Prozess, weshalb Kapitel 8.3 beide Ergebnisse gemeinsam vorstellt.

7.5 Entwicklung einer Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden

Um die im Bauwesen bisher weitestgehend unbekanntes bzw. nur selten eingesetzten Produktentwicklungsmethoden für einen Transfer vorzubereiten bzw. bereitzustellen, beantworten Honold et al. [HONOLD19B, S. 3] die Frage, wie sich die Vielzahl an Produktentwicklungsmethoden und deren Vielseitigkeit auch Fachfremden anschaulich vermitteln lässt, um gleichzeitig eine Methodenauswahl zu ermöglichen. Der Lösungsvorschlag basiert auf einer im Rahmen einer vom Autor dieser Arbeit betreuten Studienarbeit [FISCHER18] konzeptionierten und ausgearbeiteten Methodenlandkarte für die Sammlung bzw. der Auswahl aus 133 etablierten Produktentwicklungsmethoden. Das in Bild 7.3 schematisch dargestellte Ergebnis ist in einem gemeinsamen Beitrag [HONOLD19B] veröffentlicht, in dem auch die systematische Erarbeitung und eine Anwendungsevaluation erläutert sind. Die Methodenlandkarte wurde für einen Ausdruck im Format DIN A0 vorgesehen. Für eine vollständige, leserliche Darstellung wird auf [HONOLD19B, S. 8] oder Anhang A.12 (der im Internet zugänglichen digitalen Version) dieser Arbeit verwiesen.

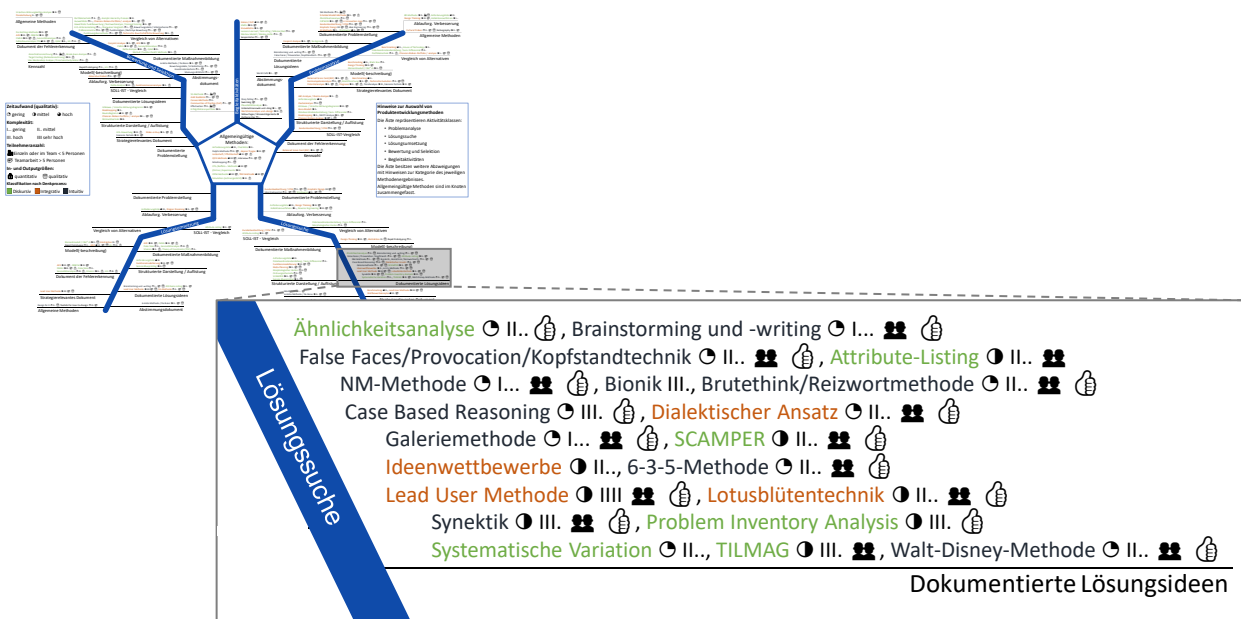


Bild 7.3: Schema der Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden, nach Fischer [FISCHER18] bzw. Honold et al. [HONOLD19B, S. 8]; siehe vollständige Darstellung im Anhang A.12

Die Methodenlandkarte besteht aus fünf Ästen, die typische Aktivitäten der Produktentwicklung (Problemanalyse, Lösungssuche, Lösungsumsetzung, Bewertung und Selektion sowie Begleitaktivitäten) repräsentieren. Die jeweiligen Äste gliedern sich in Zweige auf, welche Methoden bündeln, die vergleichbare Ergebnisse (z. B. „Dokumentierte Lö-

sungsideen“) anstreben. Die Äste laufen im Zentrum der Darstellung zusammen, das allgemein anwendbare Methoden gesammelt darstellt. Aus Gründen der Übersicht dienen Symbole zur weiteren Klassifizierung der Methoden, die mittels einer Legende erläutert werden. Für eine Methodenauswahl wird der Anwender folglich über den Ast der individuell anstehenden Aktivität zum Zweig des gewünschten bzw. benötigten Ergebnisses geleitet und trifft eine Selektion aus den vorgeschlagenen Methoden unter Berücksichtigung der weiteren symbolisch beschriebenen Klassifikationskriterien. Zu diesen gehören der Denkprozess, welcher der Methode zugrunde liegt (intuitiv, diskursiv, integrativ), Randbedingungen wie Zeitaufwand, Komplexität, Teilnehmerbedarf sowie (quantitative oder qualitative) In- und Outputgrößen. [HONOLD19B, S. 7]

Aus der Evaluation von Honold et al. (vgl. Anhang A.14) geht hervor, dass die Methodenlandkarte auch im Feld der Produktentwicklung einen Mehrwert bietet. Neben erfahrenen Produktentwicklern, die für eine spezifische Problemstellung eine geeignete Methode auswählen oder zu einer bekannten Methode Alternativen identifizieren möchten, können unerfahrene Methodenanwender wie auch Fachfremde die Methodenlandkarte als Übersicht und Einstieg in die methodische Produktentwicklung nutzen. [HONOLD19B, S. 7 ff.]

7.6 Evaluation der Konzeption des Methodenbaukastens

Die nachfolgend erläuterte Evaluation des Methodenbaukastens bzw. der Methodenlandkarte als Ansätze zur Bereitstellung von Methoden gliedert sich in die Vorstellung der Vorgehensweise und Zielsetzung in Abschnitt 7.6.1 sowie der Zusammenfassung der Ergebnisse in Abschnitt 7.6.2. Wie bereits erwähnt, erfolgt die Evaluation des ausgearbeiteten Methodenbaukastens in Kapitel 8.7. Der Fokus liegt im Folgenden daher zunächst auf der Evaluation von dessen Konzeption sowie der Methodenlandkarte.

7.6.1 Vorgehen und Zielsetzung der Evaluation

Die nachfolgend vorgestellte Unterstützungsevaluation hat den Zweck, eine Grundlage für die weitere Ausarbeitung der methodischen Unterstützung zu bilden. Die Evaluation der Anforderungsdefinition an den Methodenbaukasten sowie der fünf Darstellungs- bzw. Auswahlkonzepte mit vier wissenschaftlichen Mitarbeitern der methodischen Produktentwicklung sowie acht unmittelbar am Forschungsprojekt Beteiligten wird bereits von Honold et al. [HONOLD19C, S. 175 ff.] thematisiert. Im Rahmen eines Workshops mit interdisziplinären Vertretern des Planungsteams wurde zudem der Steckbrief für die Erfassung von 30 Methoden eingesetzt und dessen Eignung aufgezeigt [HONOLD19C, S. 175 ff.]. Im Folgenden wird die Evaluation mit den in Kapitel 4.4 vorgestellten Evalua-

tionspartnern vervollständigt. Dies betrifft auch das Feedback zur vorgestellten Methodenlandkarte, die im Rahmen einer Anwendungsevaluation von Produktentwicklern bereits positive Bewertungen (vgl. Anhang A.14) erhielt [HONOLD19B, S. 7 ff.].

Die erweiterte Evaluation dieser Forschungsergebnisse erfolgte, nachdem zugrunde gelegte Anforderungen, Steckbrief, Darstellungs- und Auswahlkonzept sowie die Methodenlandkarte vorgestellt wurden, anhand der Fragen 6 und 7 (Konzeption Methodenbaukasten) sowie 8 (Methodenlandkarte) des in Anhang A.5 vorgestellten Evaluationsfragebogens. Nachfolgender Abschnitt fasst die Auswertung der Antworten zusammen.

7.6.2 Diskussion der Evaluationsergebnisse

Vom Architekten und den Tragwerksplanern als Vertreter der Baupraxis wurde bestätigt, dass systematische Methodensammlungen wie die vorgestellte Methodenlandkarte auch in vergleichbarer Art im Bauwesen nicht bekannt sind. Die Darstellung der Methodenlandkarte wirke „erschreckend“ aufgrund der hohen Anzahl verfügbarer Methoden, die auf ein systematisches Vorgehen in der Produktentwicklung bzw. dem Maschinenbau hinweise. Die Planung von Tragwerken erfolge vergleichsweise „methodenarm“ und weniger systematisch mit zum Teil „antiquierten“ Methoden. Am ehesten seien Kreativitätstechniken, d. h. Methoden zur Lösungssuche bekannt. Allerdings werden auch Trendthemen analog zur Produktentwicklung analysiert und z. B. die Potenziale des Design Thinking innerhalb der Tragwerksplanung als auch für die Kooperation mit der Architektur diskutiert. Solche Themen erhalten schrittweise Einzug in die Praxis.

Auf die gestellte Evaluationsfrage 6, inwiefern die Evaluationspartner dem vorgestellten Bedarf und der Zielsetzung der Entwicklung des Methodenbaukastens zustimmen, bestätigten diese den Bedarf und die abgeleitete Anforderungsdefinition. Wesentlicher Grund ist aus Sicht der Vertreter der Architektur die Sammlung der Methoden vorhergehender und erfolgreicher Planungsprojekte, die als Nachschlagewerk bzw. Orientierung für nachfolgende Projekte dienen und gleichzeitig eine dokumentierte Vorgehensweise beinhalten. Aus der Systemdynamik wurde die gesteigerte Transparenz beim Vorgehen während der Planung bzw. durch die Übersicht über die Methoden der einzelnen Disziplinen festgestellt. Hinweisend angemerkt wurde, dass für den Methodenbaukasten die Übersichtlichkeit und die selbsterklärende Anwendbarkeit eine entscheidende Voraussetzung für den Erfolg, d. h. einer sich durchsetzenden Anwendung, darstellt. Aus Sicht des Architekten wird insbesondere die Umsetzung der letzten Anforderung, die die Sammlung der bewährten Methoden im Prozessdiagramm adressiert, als Mehrwert betont. Als Fazit

lässt sich zusammenfassen, dass die Anforderungsdefinition an den zu entwickelnden Methodenbaukasten auch durch die Evaluationspartner bestätigt wurden, wobei keine Ergänzungen hervorgingen.

Frage 7, inwiefern die Sammlung von Auswahlssystemen zur Entwicklung des Methodenbaukastens als geeignete Grundlage angesehen wird, um Methoden für die Planung adaptiver Gebäude zielgerichtet bereitzustellen und auswählen zu können, wurde ebenfalls zustimmend, aber knapp beantwortet. Dies könnte an den noch abstrahierten Darstellungsformaten liegen, da die Bewertung des ausgearbeiteten Methodenbaukastens wesentlich umfangreicher ausfiel (vgl. Kapitel 8.7). Im Rahmen der Vorstellung gegenüber allen Evaluationspartnern sind keine weiteren Darstellungs- oder Auswahlkonzepte für den Methodenbaukasten erwähnt oder vorgeschlagen worden.

Umfassender diskutiert wurden die Antworten zur Frage 8, inwiefern sich die Evaluationspartner vorstellen können, die bereitgestellte Methodenlandkarte bei aufkommenden Problemstellungen zur Auswahl geeigneter Methoden anzuwenden. Die Darstellung der Methodenlandkarte weckte bei der Vorstellung großes Interesse, müsste aus Sicht der Vertreter der Tragwerksplanung jedoch weiterentwickelt werden. Auf Basis des ersten Eindrucks beinhaltet die Methodenlandkarte zu viele Methoden (ohne direkten Kontext) für eine Anwendung im Feld der Tragwerksplanung. Für eine Integration der Methoden in den (adaptiven als auch konventionellen) Planungsprozess ist eine Vorauswahl gängiger Methoden als „Einstieg in die Methodenwelt“ notwendig.

Während sich die internen Evaluationspartner gegenüber einer Anwendung prinzipiell offen zeigten, sich diese „gut vorstellen“ könnten und diese „sinnvoll erscheint“, wird von einem Evaluationspartner für „unerfahrene Methodiker“ zum Einstieg eine Schulung gewünscht, da sonst für eine Anwendung ein hohes Maß an Zeitaufwand und Motivation vorauszusetzen wäre. Kritisch angemerkt wurde aus Sicht des berufserfahrenen Architekten der Einstieg in den Methodenbaukasten, da bisher eigene Lösungen immer ausreichten bzw. über die Berufsjahre angeeignete Vorgehensweisen stets eine Lösung hervorbrachten. Anstelle einer Einfeldung in die Methodenlandkarte wird daher die Verwendung eigener Erfahrungswerte samt etablierter und erfolgreicher persönlichen Werkzeuge und Methoden vorgezogen. Von diesem Evaluationspartner wird aber die Eignung für Berufseinsteiger erkannt, die noch wenig Erfahrung haben und sich individuelle Arbeitstechniken aneignen.

Konträr dazu fiel das Urteil des beteiligten Konstrukteurs der Aktorik aus, der eine „sich selbst ergebende Anwendung der Methodenlandkarte bei auftretenden Problemen oder

Herausforderungen“ prognostiziert, um mit dessen Unterstützung systematisch Lösungsansätze zu erarbeiten.

Im Allgemeinen wurde die strukturierte Darstellung trotz beachtlicher Anzahl berücksichtigter Methoden positiv kommentiert. Die Vielzahl und Vielseitigkeit der Produktentwicklungsmethoden ließ sich somit im Rahmen dieser Evaluation auch durch fachfremde Disziplinen bestätigen. Im Rahmen dieser Evaluation wurde die Weiterentwicklung hinsichtlich einer digitalen bzw. interaktiven Lösung mehrfach angeregt.

8 Prozess für die Planung adaptiver Tragwerke

Dieses Kapitel stellt den erarbeiteten Prozess sowie die eingebetteten Methoden als methodische Unterstützung für die Planung adaptiver Tragwerkssysteme vor. Das Ziel ist die Beantwortung von Forschungsfrage 4, welche Schnittstellen zwischen Disziplinen und deren Aktivitäten in den frühen Phasen des Planungsprozesses adaptiver Tragwerke existieren und wie die Ergebnisse systematisch erarbeitet werden können. Das Kapitel beschreibt zunächst das Vorgehen zur Erarbeitung der Ergebnisse (Abschnitt 8.1), die Kernaktivitäten des Prozesses (Abschnitt 8.2) sowie die Einbindung entwickelter bzw. transferierter Methoden (Abschnitt 8.3 bis 8.5). Neben der Prozessdarstellung wird ein im Vergleich dazu abstrahiertes Vorgehensmodell in Form eines auf den Anwendungskontext transferiertes W-Modells erläutert (Abschnitt 8.6). Das Kapitel schließt mit der Evaluation der Ergebnisse (Abschnitt 8.7) ab.

8.1 Ansatz und Vorgehensweise der Erarbeitung der Unterstützung

Der in Abschnitt 8.2 vorgestellte Prozess beruht auf der weiteren Ausarbeitung des Ansatzes zum Entwurf adaptiver Tragwerkssysteme [HONOLD19A] unter Berücksichtigung des konventionellen Vorgehens, des Unterstützungsbedarfs aus Kapitel 6.2 und der Anforderungen aus Kapitel 6.3. Darunter fallen die Erweiterung auf den gesamten Planungsprozess sowie der Abbildung des Lebenszyklus bis zum Rückbau, sodass auch Methoden späterer Aktivitäten, wie beispielsweise die vierte Stufe des Bewertungsmodells der Umweltwirkungen (Abschnitt 8.3.3), eingebunden werden können. Als Grundgerüst des Prozesses dienen die in Kapitel 2.2.4 vorgestellten und typischerweise systematischen Vorgehensweisen zugrunde gelegten „drei Hauptschritte der Problemlösung“.

Auch wenn der Prozess in Abschnitt 8.2 zur Vermittlung eines Überblicks über dessen Kernaktivitäten vor den darin eingebundenen Methoden ab Abschnitt 8.3 vorgestellt wird, erfolgte eine parallele Erarbeitung, um deren Kopplung bzw. gegenseitige Abhängigkeiten berücksichtigen zu können.

8.2 Kernaktivitäten des Prozesses

Der entwickelte Prozess wird in Bild 8.1 auf Seite 123 dokumentiert. Auf die Darstellung beziehen sich die nachfolgenden Erläuterungen und deren Bestandteile werden schrittweise vorgestellt. Der Prozess berücksichtigt in Spalten die sechs Disziplinen Architektur, Tragwerksplanung, Systemdynamik, Maschinenbau, Umweltbilanzierung und Sicher-

heitstechnik und ordnet diesen über den Lebenszyklus Aktivitäten zu, die als Kästchen im Prozess grafisch abgegrenzt sind. Die Kästchen stehen für einzelne oder mehrere Aktivitäten der zugeordneten Disziplin und tragen eine Bezeichnung, die die jeweiligen Aktivitäten zusammenfasst. Mehrere Aktivitäten werden zeilenweise in Planungsphasen abgegrenzt.

Die Bezeichnungen der Phasen sind aufgrund der geeigneten Granularität in Anlehnung an die Phasen der Methodik zur Entwicklung technischer Produkte und Systeme [VDI 2221-1 2019] gewählt und werden durch die weiteren gebräuchlichen Bezeichnungen der Lebenszyklusphasen eines Gebäudes vervollständigt. Die Wahl der Bezeichnung erfolgte auch, um die Konzeptphase im frühen Planungsstadium explizit abgrenzen und aufgrund der identifizierten Bedeutung hervorheben zu können. Den Prozessphasen sind am rechten Rand Fragestellungen zugeordnet, deren Beantwortung das zugrundeliegende Ziel der Phase umfasst. Die Formulierungen haben bei der Prozessentwicklung die Abgrenzung der Prozessphasen unterstützt und die zugehörigen Antworten stellen bei der Anwendung zu erreichende Meilensteine dar.

Auf die Matrixdarstellung des Planungsprozesses wird in den nachfolgenden Unterabschnitten näher eingegangen, wobei Abschnitt 8.2.1 die Disziplinen und Abschnitt 8.2.2 die Phasen des Planungsprozesses vorstellt. Die Aktivitäten selbst werden mit der Zuordnung unterstützender Methoden ab Abschnitt 8.3 erläutert.

Die im Prozess die Aktivitäten verbindenden Pfeile deuten im jeweiligen Stadium auf einen wesentlichen Austausch von Ergebnissen bzw. deren Abhängigkeiten bei der Erarbeitung hin, wobei ein weiterer Austausch aufgrund individueller Gegebenheiten keinesfalls ausgeschlossen ist. Aktivitäten, deren grafische Umrandung mehrere Disziplinen einbezieht, repräsentieren in diesem Stadium einen vergleichsweise intensiven Austausch der Disziplinen, der nicht praktikabel durch die Pfeile abbildbar ist. Außerdem stellt diese Art von Aktivitäten einen gemeinsamen und somit gleichzeitig anzustrebenden Meilenstein dar. Das dafür notwendige parallele Vorgehen wird somit bewusst gefordert, um durch den interdisziplinären Austausch konzeptbestimmende Anforderungen frühzeitig zu identifizieren und Iterationen zu reduzieren. Auch parallel angeordnete und verschiedenen Disziplinen zugeordnete Aktivitäten sollten aus dem Grund nicht zeitversetzt, sondern wie abgebildet zeitgleich bearbeitet werden. Das Parallelisieren sorgt für kürzere Regelkreise, einen höheren Grad der Abstimmung und somit weniger Fehler bzw. bessere Qualität [EHRENSPIEL17, S. 277]. Aufgrund projektspezifischer Ausprägungen wer-

den die Pfeile nicht näher bezeichnet. Stattdessen wird auf die im Rahmen dieses Kapitels enthaltene Vorstellung der Aktivitäten und zugehörigen Abhängigkeiten verwiesen.

Der Fokus des Prozesses liegt auf dem Planungsvorgehen und dessen höher ausdetaillierten Konzeptphase, da in diesem Stadium die wesentlichen Aktivitäten des interdisziplinären Zusammenspiels für die Ermittlung des für das Projekt bestmöglichen Lösungskonzepts erfolgen (vgl. Schwerpunkt der Entwicklung in Kapitel 2.2.2.1). Darunter fallen die konzeptionelle Entwicklung der Lösungsansätze, Entscheidungen bezüglich deren weiteren Realisierung und die Integration in ein Gesamtsystem. Letzteres entspricht im Fall eines Abbilds des Entwurfs in BIM den Prinzipien der MacLeamy-Kurve (vgl. Kapitel 2.3.4). Die nachfolgenden Planungsschritte werden lösungsgetrieben fortgeführt und stehen im Detail in Abhängigkeit zur individuellen Lösung. Eine Detaillierung weiterer Prozessschritte wird mit bzw. nach der Realisierung und Inbetriebnahme des Experimentalhochhauses möglich und ist folglich nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit.

Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen des Ergebnisses folgen abschließende Anmerkungen. Der Prozess ist als generischer Prozess zu verstehen, sodass dieser in seiner verallgemeinerten Form an die Randbedingungen eines jeweiligen Planungsprojekts anzupassen ist (vgl. Kapitel 2.2.3). Zu berücksichtigen ist, dass die Größe der grafischen Darstellung der Aktivitäten sowie Phasen keinen Maßstab für deren erforderlichen Zeitaufwand darstellt. Wie bereits erwähnt, werden die veränderten Randbedingungen beim (gestalterischen bzw. künstlerischen) Entwurf von adaptiven Systemen im Bereich der Architektur als eigenstehende Forschungsarbeiten untersucht [vgl. LEISTNER20; MAIERHOFER19]. Aus diesem Grund sind die in der Spalte der Architektur festgehaltenen Aktivitäten kein vollständiges Abbild, sondern eine (erste) Ergänzung der bisherigen Leistungsbilder der HOAI für die Umsetzung der Adaptivität.

8.2.1 Abgrenzung der Disziplinen des Planungsprozesses

Dieser Abschnitt stellt die maßgeblich im Planungsprozess verankerten Disziplinen und deren jeweiliges Ziel in Zusammenhang mit der Planung des adaptiven Tragwerkssystems vor. Die Beschreibungen basieren auf den Zuständigkeiten und Erkenntnissen während der Planung des Experimentalhochhauses. Während im entwickelten Planungsprozess die Disziplinen Architektur, Tragwerksplanung, Systemdynamik und Maschinenbau zur Erarbeitung des Lösungskonzepts überwiegend Schritte der Analyse und Synthese umsetzen, sind die Umweltbilanzierung und die Sicherheitstechnik vorwiegend durch analysierende und beratende Tätigkeiten mitwirkend. Die beiden letzteren sind auf Basis

der Erkenntnisse der Planung des Experimentalhochhaus und des davon abgeleiteten Unterstützungsbedarfs (Kapitel 6.2) in den Prozess aufgenommen worden. Darüber hinaus bleiben die in Kapitel 2.3.3 erwähnten Leistungen von Fachplanern und Gutachtern Prozessbestandteile. Diese sind jedoch aufgrund der projektspezifisch variierenden Leistungsumfänge und deren nicht näher untersuchten Veränderungen durch die Adaptivität nicht abgebildet.

Architektur

Wie bislang wird das Planungsvorgehen nach dem Aufkommen des Bedarfs seitens der Bauherren durch die Vertreter der Architektur eingeleitet. Bisherige Kompetenzen des Projektmanagements wie der Projektsteuerung, der Kostenübersicht sowie der Funktion als übergreifender Ansprechpartner verbleiben unverändert.

Die Vertreter der Architektur stellen in einem frühen Stadium die Ergebnisse der Bedarfsermittlung und den architektonischen Vorentwurf als zentrale Grundlage für das folgende interdisziplinäre Planungsvorgehen bereit. Anschließend besteht die Verantwortung für die fortwährende Prüfung des Lösungskonzepts des adaptiven Systems hinsichtlich der Kompatibilität gegenüber dem architektonischen Gesamtkonzept. Die Planungsleistungen der Beteiligten sind kontinuierlich im architektonischen Entwurf einzubinden – idealerweise in einem disziplinenübergreifenden digitalen BIM-Datensatz.

Tragwerksplanung

Das Tätigkeitsfeld der Tragwerksplanung bildet die wesentliche Schnittstelle für die Disziplinen Systemdynamik und Maschinenbau und wird dadurch im Vergleich zum konventionellen Planungsprozess umfassend erweitert. Die Vertreter entwerfen auf Grundlage der zu erwartenden Lastfällen das Tragwerkskonzept, integrieren das adaptive System in Kooperation mit der Systemdynamik und dem Maschinenbau und führen die notwendigen Nachweise. Daneben erfolgt die Ausarbeitung aller passiven Tragwerkselemente. Bis zur Ausschreibung stimmen die Vertreter die Tragwerkskonstruktion mit der Architektur für die Abbildung im gemeinsamen Datensatz ab.

Systemdynamik

Das Ziel der Beteiligten aus dem Fachgebiet der Systemdynamik beruht darin, die Eigenschaften erster Tragwerkskonzepte mittels Modelle zu erfassen und deren Verhalten hinsichtlich eintretender Lastsituationen zu simulieren. Auf Grundlage gewonnener Erkenntnisse ist das Systemverhalten mit der Tragwerksplanung zu optimieren bzw.

auszuarbeiten. Darunter fällt die Ermittlung des Potenzials eines adaptiven Systemverhaltens, der Bewertung von dessen Stellgrößen mit zugehörigen Positionen und funktionalen Eigenschaften von Sensoren und Aktoren sowie der sukzessiven Auslegung der weiteren Systemkomponenten. Zu letzteren zählen die Hardware und Software zur Steuerung bzw. Regelung sowie Komponenten der Energieversorgung.

Maschinenbau

Das Aufgabenfeld der Vertreter des Maschinenbaus umfasst die Entwicklung der adaptiven Elemente zur Beeinflussung des Lastzustands. Eine Abgrenzung zu den konstruktiven Tätigkeiten der Tragwerksplanung lässt sich zwischen den aktiven, beweglichen Teilen und deren Schnittstellen zu den passiven Teilen als Zuständigkeit des Maschinenbaus und die passiven Tragwerkselemente als Aufgabenfeld der Tragwerksplanung festlegen. Der Einstieg des Maschinenbaus erfolgt mit einer Machbarkeitsanalyse, inwiefern bereits ermittelte und geforderte Stellgrößen konstruktiv in gegebenen Bauräumen realisierbar sind. Daraufhin sind Wirkprinzipien und Lösungskonzepte zu ermitteln und nach der Konzeptauswahl die Konstruktion bis auf Bauteilebene für eine Fertigung auszuarbeiten.

Umweltbilanzierung

Die Bilanzierung von Material- und Energiebedarf auch während des späteren Betriebs des adaptiven Gebäudes ist das primäre Ziel der Vertreter der Umweltbilanzierung. Die Herausforderung stellt der Umgang mit den wenigen Informationen in frühen Planungsstadien dar. Während der weiteren Planung weisen die Vertreter auf Konzeptbestandteile mit hohen Umweltwirkungen hin, um disziplinenübergreifend projektspezifische Optimierungspotenziale zu ermitteln. Das Bewertungsergebnis einer im Vergleich zur konventionellen Bauweise geringeren Umweltwirkung motiviert den Mehraufwand des adaptiven Systems bei der Planung sowie nachfolgenden Lebenszyklusphasen. Das Bewertungsergebnis für ein realisiertes Gebäudes dient als Messlatte für zukünftige Projekte mit vergleichbaren Randbedingungen.

Sicherheitstechnik

Die Verantwortung der Vertreter der Sicherheitstechnik umfasst die Ermittlung von Fehlerfällen bzw. -zuständen des adaptiven Tragwerkssystems und in nachfolgenden Planungsschritten die Beurteilung des Ausfallrisikos des Gesamtsystems, einzelner Baugruppen sowie deren Einzelkomponenten. Aufgrund des dazu benötigten, weitläufigen technischen Verständnisses sind Kenntnisse sowohl aus den Fachbereichen der Kon-

struktion als auch der Informationsverarbeitung notwendig. Das Ziel dieser Vertreter ist es, Fehlerfälle und kritische Zustände vor deren Eintreten und somit bestenfalls im frühen Planungsstadium zu identifizieren. Falls möglich, ist der Eintritt durch Maßnahmen auszuschließen bzw. das Gefährdungspotenzial der jeweiligen Fehlerfolge durch Maßnahmen zu reduzieren. Das Sicherheitskonzept des adaptiven Systems ist für die Genehmigungsplanung von hoher Relevanz. Bei der Vorbereitung der Genehmigungsplanung könnte zukünftig eine Zertifizierung oder ein Gutachten ein Ergebnis dieser Disziplin darstellen.

8.2.2 Abgrenzung von Phasen des Planungsprozesses

In diesem Abschnitt werden die Phasen des Prozesses in chronologischer Reihenfolge Aktivitäten übergreifend vorgestellt. Dabei wird auf die den jeweiligen Phasen zugrundeliegende(n) Fragestellung(en) Bezug genommen, die rechts neben der Prozessdarstellung in Bild 8.1 festgehalten sind, sowie auf die jeweils zu erreichenden Meilensteinen eingegangen. Um Doppelungen zu vermeiden, wird für die Beschreibung der Aktivitäten der Umweltbilanzierung und Sicherheitstechnik auf die Kapitel 8.3.3 und 8.3.4 verwiesen.

Analysephase

Nach der Beauftragung des Planungsprojekts beginnen die Vertreter der Architektur mit der Grundlagenermittlung, zu denen Randbedingungen des Projekts, der späteren Nutzung und des baulichen Umfelds zählen. Diese gewöhnliche Grundlagenermittlung wird durch die Fragestellung begleitet, *welche Wechselwirkungen zwischen Umwelt und errichtetem Gebäude bestehen werden*. Betreffen diese Wechselwirkungen das Tragwerk, ist durch die Tragwerksplanung zu prüfen, *inwiefern veränderliche Lasten im Tragwerk zu erwarten sind*. Auf Grundlage der das Konzept bestimmenden Randbedingungen wie Gebäudetypologie und geschätzte Gebäudegröße sowie der Erfahrungswerte bzgl. der Umweltwirkungen bestehender Gebäude ist zu prüfen, *ob ein adaptives System (sonstige) Potenziale darstellt*. Sprechen die Antworten für einen Entwurf mit adaptiven Tragwerkelementen, beginnt die mehrstufige Definition von Anforderungen durch die Architektur im Rahmen der Bedarfsermittlung. Insbesondere die Anforderungen an die adaptiven Systeme müssen für die Zusammenarbeit der interdisziplinären Beteiligten und der Kompatibilität jeweiliger Ergebnisse festgehalten sein. Zur Unterstützung diesbezüglicher Aktivitäten wird der in Abschnitt 8.4 vorgestellte Requirements Engineering Ansatz erarbeitet. Da während der Analysephase bereits Vorgaben für Lösungskonzepte entstehen bzw. zu prüfen sind, entsteht ein fließender Übergang zur Konzeptphase.

Konzeptphase

Die interdisziplinäre Lösungsfindung wird durch die Bereitstellung des architektonischen Vorentwurfs in einem frühen Stadium angestoßen. Auf den Vorentwurf bauen stark abstrahierte Tragwerkskonzepte bzw. deren Formfindung auf und geben ersten Aufschluss hinsichtlich der Realisierbarkeit. Mittels dynamischer Modellierung und Simulation sind Tragwerkskonzepte auf das Verhalten von Lastzuständen und deren Beeinflussbarkeit durch Aktoren zu bewerten. Dabei wird die Frage beantwortet, *welche Komponenten aktiviert werden sollen*. In diesem Stadium steigen Ingenieure des Maschinenbaus in Form einer Machbarkeitsanalyse und einer gemeinsamen Konzeptentwicklung der aktiven Elemente in den Prozess ein. Zunächst erfolgt die Bewertung, *inwiefern die Stellgrößen der Adaptivität an den ermittelten Tragwerkspositionen durch Aktoren realisierbar sind und ob sich diese konstruktiv in das Tragwerk integrieren lassen*. Mit allen Beteiligten ist daraufhin abzuleiten, *welche Anforderungen an die Aktuierung gestellt werden*. Die Anforderungsdefinition ermöglicht daraufhin die zielgerichtete Konzeption der Aktorintegration. Nachfolgend sind in den Disziplinen potenzielle Konzepte weiter zu konkretisieren und der Frage nachzugehen, *wie das Tragwerk aktiviert werden „kann“*. Zum Abschluss der Konzeptphase werden ermittelte Konzepte gemeinsam bewertet und ein zur Weiterverfolgung favorisiertes Konzept ausgewählt. Die Entscheidung beantwortet die Frage, *wie das Tragwerk aktiviert werden „soll“*. Der Tragwerksbewertungsansatz in Abschnitt 8.5 veranschaulicht, dass eines der zu bewertenden Konzepte auch ein passives System darstellen kann, sodass bei dessen Auswahl die weitere Planung und Realisierung konventionell erfolgt. Veranschaulicht wird ein mögliches Vorgehen beim Konzipieren durch die Erläuterungen in Kapitel 5.2.2.

Entwurfsphase

Nach der Festlegung auf ein Konzept wird dieses von allen beteiligten Disziplinen in Form von Entwürfen ausgestaltet und detailliert. In Bezug auf die adaptiven Systeme steht die Frage im Vordergrund, *welche Systemkomponenten für die Aktuierung erforderlich sind*. Die Ergebnisse sind daraufhin im architektonischen Entwurf zusammenzuführen. Diese Integration dient zum Abgleich der Ergebnisse, die eine Kompatibilität untereinander und eine Erfüllung der aufgestellten Anforderungen aufweisen müssen. Das Ergebnis beantwortet die Frage, *ob die Systemkomponenten nach deren Entwurf aufeinander abgestimmt sind*. Die Zusammenführung dient folglich als erste Validierung, deren zugrundeliegende Lösung sich erstmals auch mit quantifizierten Eigenschaften (vgl. Abschnitt 8.3.3) hinsichtlich der Umweltwirkungen und des Ausfallverhaltens bewerten lässt.

Das Ergebnis der Validierung bzw. Bewertung veranlasst gegebenenfalls Iterationschleifen in Form von Konzeptanpassungen.

Den Abschluss der Entwurfsphase stellt die Genehmigungsplanung dar, d. h. die Vorbereitung aller notwendigen Unterlagen zur Beantragung der Baugenehmigung. Diese ist, im Vergleich zu konventionellen Lösungen, um die erläuternde Dokumentation der Bestandteile der adaptiven Systeme zu erweitern.

Ausarbeitungsphase

Nach der Baugenehmigung ist der Entwurf von allen Beteiligten weiter zu detaillieren, sodass aus den schließlich resultierenden (Zeichnungs-)Dokumenten bzw. Beschreibungen eine Ausführung, d. h. die Herstellung und Montage bzw. Errichtung, möglich wird. Als Zielsetzung dient die Beantwortung der Fragestellung, *wie die Systemkomponenten im Detail aussehen*.

Spätestens zum Abschluss aller detaillierenden Schritte sind die disziplinspezifischen Modelle bzw. Teilergebnisse wieder zusammenzutragen und auf Kompatibilität zu prüfen. Ähnlich zum Entwurf ist prüfend sicherzustellen, *ob die Ergebnisse der Ausarbeitung aufeinander abgestimmt sind*. Auf diesem Stand erfolgt die Freigabe der Bauausführung und somit der Herstellung der Bauteile. Dazu sind ggf. Ausschreibungsunterlagen bzw. Fertigungsaufträge zu erstellen und in Umlauf zu bringen. Hierbei empfiehlt sich entsprechend der konventionellen Planung die Ausschreibung der jeweiligen Planungsleistungen, sodass als Beispiel die Beteiligten des Maschinenbaus die Beauftragung der Komponenten der Aktorik selbst vornehmen und die Herstellung überwachen. So können in diesem Kontext die Zuständigkeit bzgl. engerer Toleranzanforderungen einschließlich dafür notwendiger Kompetenzen im Maschinenbau verbleiben und die Tragwerksplanung die üblichen Anforderungen im Stahlbau beibehalten.

Realisierungsphase

Nach erfolgter Auftragsvergabe beginnen mit der Realisierungsphase die Herstellung von konventionellen wie aktiven Komponenten sowie die Bauausführung mit Aktivitäten auf der örtlichen Baustelle. Zudem sieht die Bauüberwachung den Abgleich der Realisierungsschritte mit den planerischen Vorgaben vor. Je nach erwarteten Belastungen auf das Tragwerk ist die Inbetriebnahme von adaptiven Elementen während der Realisierung notwendig, um bereits in diesem Stadium potenziell kritische Lastspitzen in Komponenten zu vermeiden. Zur stetigen Erweiterung der Planungsexpertise dient die Leitfrage, *welche*

Erkenntnisse bei der Realisierung resultieren und wie diese bei zukünftigen Planungsvorgehen Berücksichtigung finden können.

Vor Beginn der Betriebsphase erfolgt seitens der Systemdynamik eine experimentelle Modellvalidierung, um das simulierte Systemverhalten, d. h. der Reaktion des Tragwerks auf einwirkende Störgrößen, mit dem tatsächlichen abzugleichen.

Nutzungs- und Betriebsphase

Diese Phase umfasst die eigentliche Nutzung des Gebäudes. Aufgrund des ständigen Betriebs bzw. der Betriebsbereitschaft der adaptiven Systeme gewinnt die Objektbetreuung an Bedeutung. Diese wird durch die Adaptivität in Form von Aufgaben der Wartung, Inspektion und Instandsetzung (und Renovierung) sowie ggf. eintretendem Optimierungsbedarf von Systemparametern, beispielsweise durch Softwareupdates, im Vergleich zu konventionellen Tragwerken grundlegend erweitert. Auch die Überwachung des sicheren Betriebs ist vorzunehmen und könnte wie die Wartung von technischen Systemen innerhalb von Gebäuden, z. B. von Aufzügen oder Brandschutzanlagen, Bestandteil von zyklischen Überprüfungen werden.

Die Betriebsphase sollte die wesentlichen Vorteile der Entscheidung für ein adaptives System nachweisen. Als Leitfrage während dieser Phase dient die Fragestellung, *welche Erkenntnisse im Betrieb bzw. bei der Nutzung resultieren und wie diese bei zukünftigen Planungsvorgehen Berücksichtigung finden können.*

Entsorgungsphase

Die Entsorgungsphase stellt das Lebensende („End of Life“) des gesamten Gebäudes dar. Die Phase umfasst nach der Planung des Rückbaus dessen Umsetzung sowie das Trennen und Rezyklieren oder Entsorgen der eingesetzten Komponenten und Materialien. Die dann entstehenden Aufwände und die Recyclingquote sind maßgeblich durch die Konstruktion während der Planung bestimmt [vgl. DIN EN 15804 2014, S. 25 ff.].

Für den abschließenden Erkenntnisgewinn dient die Leitfrage, *welche Erkenntnisse zum Ende des Lebenszyklus resultieren und wie diese bei zukünftigen Planungsvorgehen Berücksichtigung finden können.* Aufgrund der langen Lebenszyklen von Gebäuden ist noch zu prüfen, inwiefern sich Erkenntnisgewinne in dieser Phase bereits heute ermitteln und als Anforderungen bei der Planung berücksichtigen lassen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Phasen ab der Realisierungsphase als wichtige Informationsquelle dienen, um Erfahrungswerte aus diesen Lebenszyklusab-

schnitten in frühen Phasen nachfolgender Planungsprojekte aufgreifen zu können. Wie in der Erläuterung der Konzeptphase angedeutet, eignet sich der Prozess auch dafür, frühzeitig das Potenzial eines adaptiven Tragwerks zu ermitteln. Falls aufgrund individueller Randbedingungen eine passive Bauweise zu bevorzugen wäre, können die bis dato erarbeiteten Planungsleistungen als Grundlage für die Fortführung eines konventionellen Planungsvorgehens verstanden werden. Die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Planung eines adaptiven bzw. konventionellen Tragwerkskonzept wird von der LCA-Bewertungsmethodik (Abschnitt 8.3.3) sowie dem multidisziplinären Tragwerksbewertungsansatz (Abschnitt 8.5) unterstützt.

8.3 Vernetzung von Planungsaktivitäten und Methoden

Die bisher vorgestellte Prozessdarstellung bildet das Vorgehen zur Planung adaptiver Tragwerkssysteme mittels Disziplinen zugeordneten Aktivitäten ab. Durch die Kennzeichnung der Schnittstellen zwischen den Aktivitäten wird auf deren zeitliche als auch interdisziplinäre Abhängigkeiten hingewiesen. Wie die Umsetzung der einzelnen Aktivitäten zum Erlangen des jeweiligen Ergebnisses erfolgt und sich insbesondere jeweils methodisch unterstützen lässt, ist in diesem Abschnitt zu beantworten. Konkret lautet die Frage, welche (existierenden) Methoden sich für die Unterstützung der Planungsschritte eignen. Im Folgenden stellt daher zunächst Abschnitt 8.3.1 die Erweiterung des Prozesses um den Methodenbaukasten im Gesamtbild vor, woraufhin Abschnitt 8.3.2 auf die eingebetteten Methoden eingeht. Aufgrund der umfassenderen Entwicklung der methodischen Unterstützung zur Umweltbilanzierung durch die Integration der LCA und zur Sicherheitstechnik werden diese in Abschnitt 8.3.3 bzw. 8.3.4 getrennt vorgestellt.

8.3.1 Konzept des entwickelten integrierten Methodenbaukastens

Wie in Kapitel 7.4 erläutert, stellt das Methodendiagramm das Darstellungs- und Auswahlkonzept des Methodenbaukastens dar, das die gestellten Anforderungen in höchstem Maß erfüllt. Die Umsetzung des integrierten Methodenbaukastens in den in Abschnitt 8.2 erläuterten Planungsprozess stellt Bild 8.2 dar. Den Aktivitäten werden durch blaue Symbole in Form von Parallelogrammen eine größtenteils individuelle methodische Unterstützung zugeordnet. Diese Module sind bei der Bearbeitung der Aktivität zur Anwendung empfohlen. Die Parallelogramme bilden gleichzeitig die Kategorisierung der methodischen Unterstützung ab. Dunkelblaue Parallelogramme stehen für eine Methode, hellblaue Parallelogramme für ein methodisches Werkzeug (vgl. Kapitel 2.1.3). Weitere Hintergründe stellt Kapitel 8.3.2 vor. Die Zuordnung der Methoden und Werkzeuge zu

den Aktivitäten basiert auf deren jeweils angestrebten Ergebnissen, da diese den (Teil-) Zielen der Aktivitäten entsprechen. Abschließend wurde die Zuordnung mit den Evaluationspartnern im Rahmen der Prozessvorstellung validiert. Die Module wurden bereits während der Planung des Experimentalhochhauses eingesetzt, aufgrund des abgeleiteten Bedarfs zwischenzeitlich transferiert bzw. entwickelt oder befinden sich im Rahmen des Sonderforschungsbereichs in der Erarbeitung. Die eingetragenen Module greifen somit auf weitere Forschungsarbeiten zurück, um eine Übersicht zu generieren, welche Aktivitäten bzw. Planungsstadien bereits durch Methoden bzw. Werkzeuge unterstützt werden. Zur Erfassung dienten die in Kapitel 7.3 beschriebenen Methodensteckbriefe.

Aus der Dichte der eingetragenen Methoden ist erkennbar, dass die Unterstützung im Stadium der Konzeption umfassender ausgeprägt ist. Dies ist durch die Fokussierung dieser Arbeit sowie dem Planungsstand des Experimentalhochhauses nachvollziehbar. Der Methodenbaukasten ist daher dafür bestimmt, mit fortschreitendem Forschungsstand und in Zukunft erarbeiteten Methoden weiter befüllt zu werden.

8.3.2 Methoden und Werkzeuge des Planungsprozesses

Die Methoden und Werkzeuge (im Folgenden verallgemeinert „Methoden“), die den Planungsprozess unterstützen und in Bild 8.2 eingetragen sind, werden an dieser Stelle aufgegriffen und in Tabelle 8.1 aufgelistet. Ein von der Planung des Experimentalhochhaus abgeleiteter bzw. empfohlener Anwendungszeitpunkt geht bereits aus der Prozessdarstellung in Bild 8.2 hervor. Auf eine Zuordnung zu Phasen und Disziplinen wurde verzichtet, da die Methoden zum Teil anwendungsspezifisch auch anderweitig verwendet werden können. Tabelle 8.1 unterscheidet die Einträge jedoch in Methoden und Werkzeuge und hebt diejenigen durch Fettschrift hervor, die Forschungsgegenstand dieser Arbeit waren (ggf. mit Beteiligung weiterer Projektbeteiligter). Dabei wird in der Spalte Status unterschieden, ob eine vollständige Neuentwicklung bzw. ein Transfer (Entw.) einschließlich einer anschließenden Erprobung, eine Konzeption (Konz.) oder eine (ggf. reine) Erprobung (Erpr.) stattgefunden hat. Die letzte Spalte verweist auf weiterführende Informationen. Für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten, transferierten bzw. anderweitig erläuterten Methoden ist das zugehörige Kapitel angegeben. Für sonstige, innerhalb des SFB 1244 (weiter-)entwickelten Methoden sind vorliegende Veröffentlichungen referenziert. Für allgemeine Methoden, die in vielzähligen Varianten in den Disziplinen existieren, ein vergleichbares Ziel aufweisen aber sich jeweils im schrittweisen Vorgehen unterscheiden, wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen. Dazu zählen unter

anderem Methoden zur Formfindung bzw. -optimierung, Modellsimulation bzw. -reduktion und zum Reglerentwurf. Die Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden in Kapitel 7.5 dient als Ergänzung der bisherigen Unterstützung, z. B. im Fall individueller Problemstellungen.

8.3.3 Integration der LCA in den Planungsprozess

Standortabhängige Wechselwirkungen zwischen dem zu realisierenden Gebäude und dessen Umwelt sowie ein für die jeweilige Nutzung fokussierter Entwurf erfordern eine individuelle Ermittlung des Potenzials von reduzierten Umweltwirkungen. Dieses Potenzial ist der Zunahme an Komplexität und Aufwänden während der Planung und des Betriebs als auch den erwarteten Kosten und Sicherheitsanforderungen gegenüberzustellen und folglich vor dem Erreichen eines detaillierten Planungsstadiums zu identifizieren. Die begrenzte Informationsgrundlage in frühen Planungsstadien stellt eine zu bewältigende Herausforderung dar. Es resultiert die Frage, wie sich eine LCA zur systematischen Minimierung von Umweltwirkungen bei der Planung adaptiver Systeme in den Planungsprozess integrieren lässt. [vgl. SCHLEGL19A]

Schlegl et al. [SCHLEGL19A] stellen unter Berücksichtigung der in Kapitel 5 beschriebenen Erfahrungen aus der Planung des Experimentalhochhauses und einer umfassenden Anforderungserhebung [SCHLEGL19A, S. 8] einen Lösungsvorschlag in Form eines Stufenmodells vor, das für verschiedene Planungsstadien einen individuellen Bewertungsansatz beschreibt. Bild 8.3 stellt spaltenweise die zu durchlaufenden Planungsstadien mit jeweiligen, zur Veranschaulichung dienenden Planungsergebnissen dar. Den Planungsstadien sind die im Prozess (vgl. Bild 8.1) als Aktivitäten eingetragenen LCA-Phasen zugeordnet. Das Modell beschreibt in den jeweiligen Phasen das Vorgehen zur Ermittlung des Massen- sowie Energiebedarfs. Während zu Beginn der Planung nur Schätzungen auf Grundlage von Statistiken (vgl. Windzonenkarte [DIN EN 1991-1-4/NA 2010, S. 14] oder „Erdbebenkarten“ [DIN EN 1998-1/NA 2021, S. 12]) sowie ein Vergleich mit längerfristig bestehenden Referenzgebäuden möglich ist (Vergleichende LCA), lassen sich mit dem Vorliegen erster Entwürfe anfangs getroffene Annahmen durch Modelle, Simulationen und Hochrechnungen konkretisieren (Prognostizierende LCA). Dieses Stadium eignet sich, die in dieser Phase ermittelten Konzeptvarianten einschließlich unterschiedlicher Adaptionlevels zu vergleichen, um nach einer Auswahl die Vorzugsvariante zu detaillieren. Anhand der in der nachfolgenden Ausführungsplanung zu erarbeitenden Leistungsverzeichnisse sind für die Mengenermittlung fundierte Angaben bekannt und

ermöglichen eine umfassende Bewertung (Detaillierte LCA), wohingegen der Energieverbrauch weiter auf Simulationsergebnissen beruht. Erst während des Betriebs können die beim Bau tatsächlich eingesetzten Materialmengen aufsummiert und der Energiebedarf über einen aussagefähigen Zeitraum repräsentativ bestimmt werden (Vollständige LCA). Mit diesem finalen Ergebnis lässt sich die Aussagesicherheit zuvor getroffener Annahmen für nachfolgende Planungsprojekte steigern und somit auf ein weiteres Referenzgebäude zurückgreifen. [SCHLEGL19A]

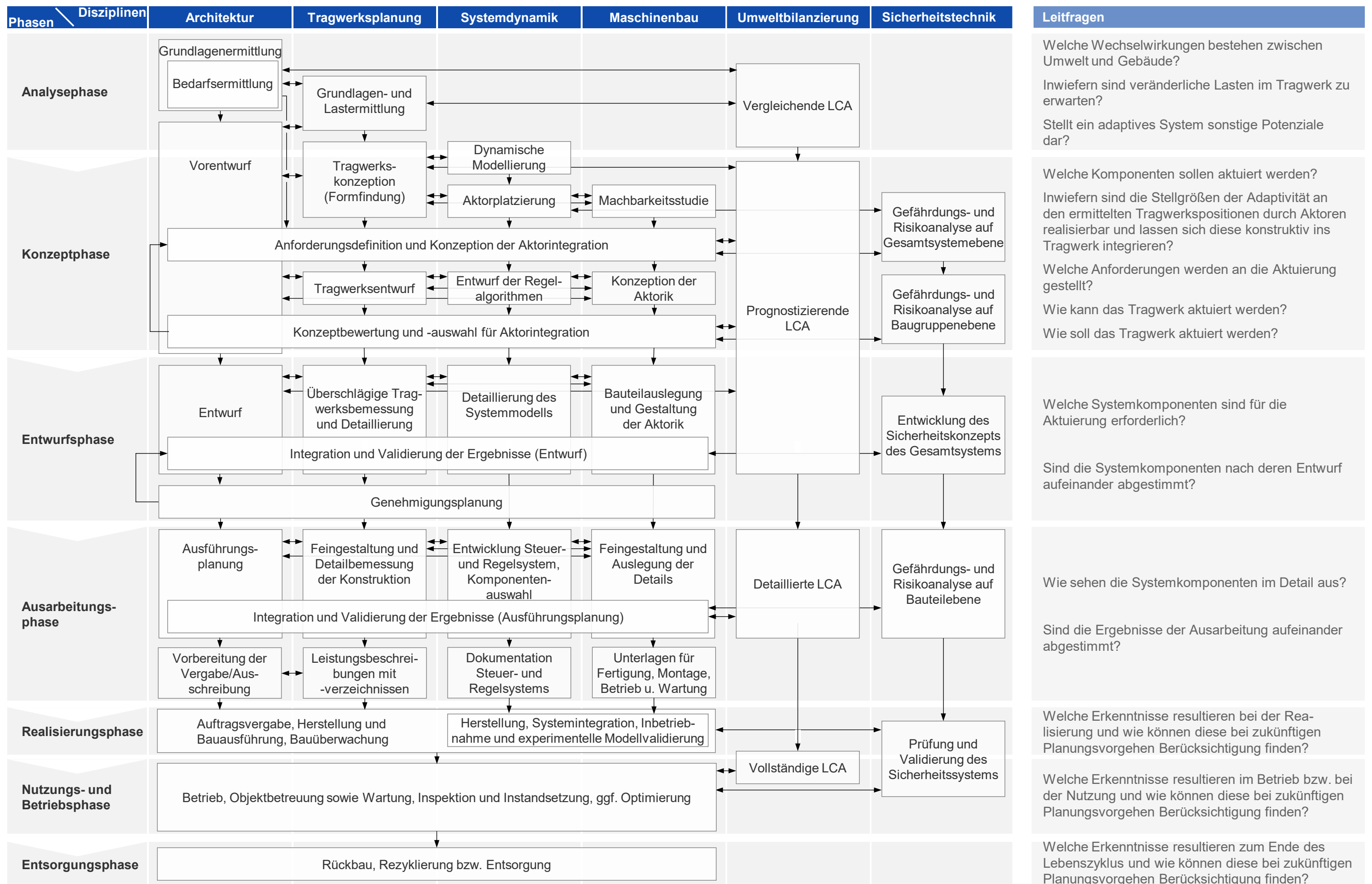


Bild 8.1: Prozess für die Planung adaptiver Tragwerkssysteme

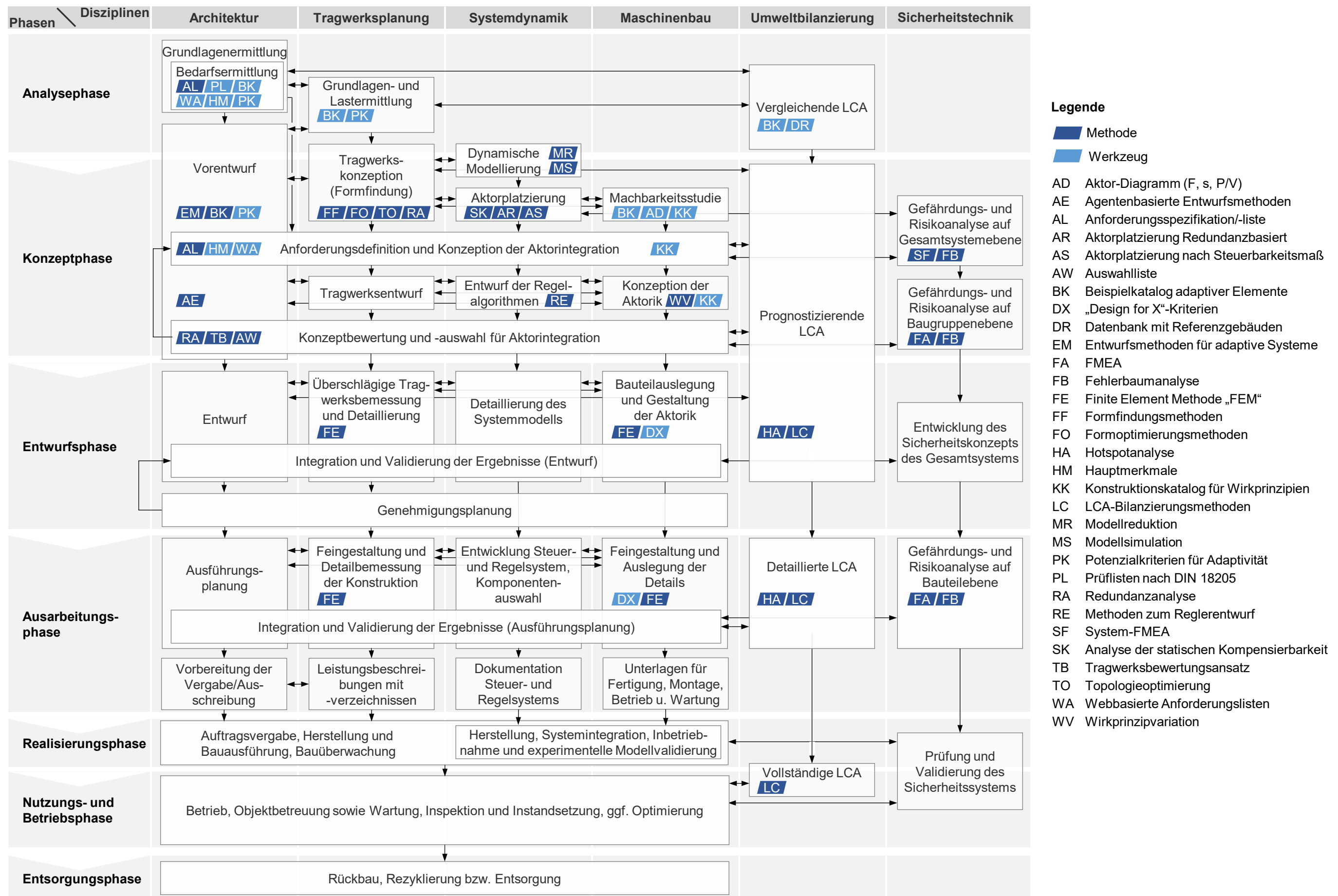


Bild 8.2: Im Prozess abgebildeter Methodenbaukasten für die Planung adaptiver Tragwerkssysteme

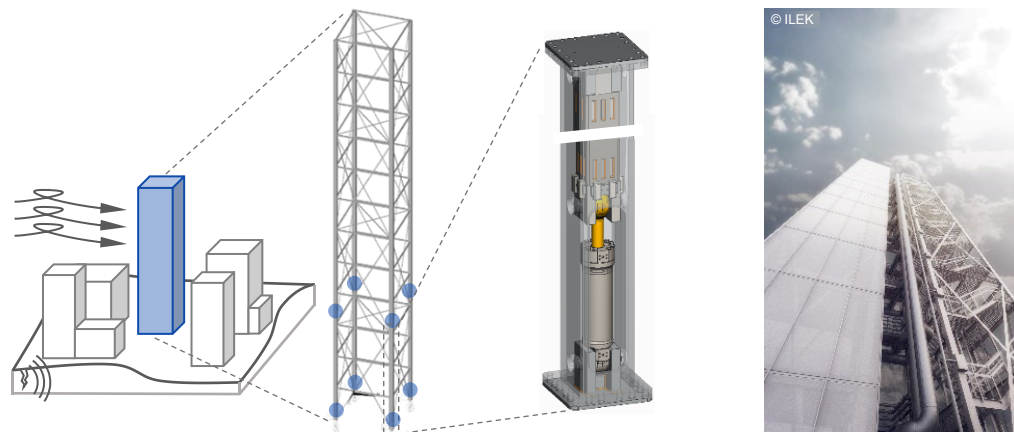
Kürzel	Bezeichnung	Methoden/ Werkzeug	Status (vgl. Legende)	Verweis
AD	Aktor Diagramm (F, s, P/V)	W	Entw., Erpr.	Kapitel 5.2.3, Anhang A.6
AE	Agentenbasierte Entwurfsmethode	M		[MAIERHOFER19]
AL	Anforderungsspezifikation/-liste	M	Entw., Erpr.	Kapitel 8.4.2
AR	Aktorplatzierung redundanzbasiert	M		[Wagner18]
AS	Aktorplatzierung nach Steuerbarkeitsmaß	M		[Wagner17]
AW	Auswahlliste	W	Erpr.	Kapitel 8.5, [PAHL07, S. 163]
BK	Beispielkatalog adaptiver Elemente	W	Konz.	Kapitel 3.4
DX	„Design for X“-Kriterien	W	Erpr.	[PAHL07, S. 393 ff.]
DR	Datenbank mit Referenzgebäuden	W	Konz.	Kapitel 8.3.3
EM	Entwurfsmethoden für adaptive Systeme	M		[vgl. LEISTNER20]
FA	FMEA	M	Erpr.	Kapitel 8.3.4
FB	Fehlerbaumanalyse	M	Erpr.	Kapitel 8.3.4
FE	Finite Element Methode „FEM“	M		[KÖNKE12, S. 283 ff.]
FF	Formfindungsmethoden	M		*
FO	Formoptimierungsmethoden	M		*
HA	Hotspotanalyse	M	Erpr.	Kapitel 8.3.3
HM	Hauptmerkmale	W	Entw., Erpr.	Kapitel 8.4.3
KK	Konstruktionskatalog für Wirkprinzipien	W	Konz.	Kapitel 5.2.3, Anhang A.7
LC	LCA-Bilanzierungsmethoden	M	Entw., Erpr.	Kapitel 8.3.3
MR	Modellreduktion	M		*
MS	Modellsimulation	M		*
PK	Potenzialkriterien für Adaptivität	W	Konz.	Anhang A.16
PL	Prüflisten nach DIN 18205	W	Erpr.	Kapitel 2.6.2, Kapitel 8.4.3
RA	Redundanzanalyse	M		*
RE	Methoden zum Reglerentwurf	M		*
SF	System-FMEA	M	Erpr.	Kapitel 8.3.4
SK	Analyse der statischen Kompensierbarkeit	M		[Wagner18]
TB	Tragwerksbewertungsansatz	M	Konz.	Kapitel 8.5
TO	Topologieoptimierung	M		*
WA	Webbasierte Anforderungslisten	W	Entw., Erpr.	Kapitel 8.4.2
WV	Wirkprinzipvariation	M	Erpr.	Kapitel 5.2.3, [PAHL07, S. 148]

Legende: Entw. = Neuentwicklung bzw. Transfer einschließlich Erprobung; Konz. = Konzeption; Erpr. = (reine) Erprobung; Zeilen in Fettschrift repräsentieren Forschungsgegenstand dieser Arbeit; * Da es sich hierbei um allgemeine Methoden der Disziplinen handelt, wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Tabelle 8.1: Kurzbeschreibung der Methoden und Werkzeuge des Planungsprozesses

Das Vorgehen wurde nach dem Entwurf des Experimentalhochhauses insofern positiv erprobt, dass die für die jeweiligen Phasen vorgesehenen Methoden rückwirkend mit der jeweils vorgelegenen Datengrundlage angewandt wurden und diese zu den jeweils angestrebten, quantifizierten Ergebnissen führten [SCHLEGL19A, S. 15 f.]. Das Stufenmodell ist daher als prozessbegleitende Bewertungsmethodik zu verstehen, die die Umwelt-

wirkungen des zu realisierenden adaptiven Gebäudes stufenweise entsprechend den verfügbaren Informationen ermittelt. Die darin enthaltenen Methoden werden von Schlegl et al. [SCHLEGL19A] am Anwendungsbeispiel des Experimentalhochhauses erläutert und umfassen die in Bild 8.2 festgehaltenen Methoden Hotspotanalyse (HA) zum Aufzeigen von Bewertungsbestandteilen mit hervorstechend hohen Umweltwirkungen sowie die an die DIN EN ISO 14040 [DIN EN ISO 14040 2009] bzw. DIN EN ISO 14044 [DIN EN ISO 14044 2021] angelehnte Lebenszyklusanalyse (LC). Als Werkzeug dienen der in Kapitel 3.4 erwähnte Beispielkatalog sowie die von Schlegl et al. [SCHLEGL19B, S. 349] vorgeschlagene Datenbank mit Referenzgebäuden (DR). Eine umfassende Darstellung der Informationsflüsse zwischen den beteiligten Disziplinen beinhaltet Anhang A.13. Die Anwendbarkeit aus Sicht der Planer wird in den Evaluationsgesprächen im Abschnitt 8.7.2 aufgegriffen.



Detaillierungsschritte während des Planungsprozesses

Planungsstadium	Grundlagen- ermittlung	Vorentwurf bzw. Konzeptphase und Entwurf	Ausführungs- planung und Vergabeprozess	Objektüberwachung und Betrieb
LCA-Phase	Vergleichende LCA	Prognostizierende LCA	Detaillierte LCA	Vollständige LCA
Ermittlung des Massenbedarfs	Schätzung auf Grundlage von Umwelteinflüssen und dem Vergleich mit bestehenden Referenzgebäuden	Schätzung auf Grundlage von Hochrechnungen und Vergleich von Konzeptvarianten unterschiedlicher Adaptionslevels	Ermittlung auf Grundlage von CAD-Modellen und Leistungs- verzeichnissen	Mengenermittlung auf Grundlage von Lieferscheinen und Aufmessen
Ermittlung des Energiebedarfs		Schätzung auf Grundlage von Simulationen und Erfahrungswerten	Bestimmung durch Messvorgänge	

Bild 8.3: Planungsstadien adaptiver Gebäude mit jeweiliger Datengrundlage zur Bewertung der Umweltwirkungen nach Schlegl et al. [SCHLEGL19A, S. 16]

8.3.4 Integration des Sicherheitskonzepts in den Planungsprozess

Durch die Adaptivität nimmt der Beanspruchungsgrad tragender Bauelemente zu (vgl. Materialausnutzung nach Senatore et al. [SENATORE19, S. 853], Kapitel 3.2). Da die Potenziale der Adaptivität nur in dessen funktionsfähigem Zustand bestehen, ist die Ausfallsicherheit und Robustheit der Systeme von systemimmanenter Bedeutung. Fehler in Betriebszuständen adaptiver Systeme lassen sich nicht grundsätzlich ausschließen, sodass eine Sicherheits- bzw. Fehleranalyse zwingend Bestandteil der Planung werden muss [vgl. OSTERTAG19, S. 1]. Folglich sind auch Anforderungen dieses Kontexts bereits in frühen Phasen zu definieren und während der Planung des adaptiven Systems umzusetzen. Zu beantworten ist daher die Frage, wie sich die Entwicklung des Sicherheitskonzepts adaptiver Tragwerke systematisch umsetzen lässt. Das Ziel des Abschnitts besteht darin, eine Schnittstelle im Planungsprozess am Beispiel konstruktiver Aspekte zu bieten, die bei der Planung des Experimentalhochhauses Anwendung fanden. Darüber hinaus sind Methoden Forschungsgegenstand, die neben der Ausfallwahrscheinlichkeit konstruktiver Elemente auch die des Regelungssystems zusammen mit dem Einfluss der Nachhaltigkeit berücksichtigen [OSTERTAG20].

Der nachfolgend vorgestellte Ansatz mit dem Ziel einer Integration des Sicherheitskonzepts in den Planungsprozess (vgl. Bild 8.1) wurde kooperativ im Forschungsprojekt mit dem Forschungsfeld „ausfallsichere Elemente“ erarbeitet und beruht auf einem abermals mehrstufigen Vorgehen, das neben der Prozessdarstellung von Bild 8.4 veranschaulicht wird. Im Stadium der Aktorplatzierung und Konzeption der Aktorik werden durch eine Gefährdungs- und Risikoanalyse auf Gesamtsystemebene Schwachpunkte der Konzepte sowie denkbar eintretende Fehlerfälle ermittelt und im Rahmen der Anforderungsdefinition Maßnahmen zu deren Vermeidung festgehalten. Die Umsetzung dieser Anforderungen erfolgt bei der weiteren Konkretisierung auf Baugruppenebene, deren Ergebnisse erneut durch eine Gefährdungs- und Risikoanalyse bewertet werden. Auch in diesem Stadium resultieren Anforderungen für die Auswahl bzw. Feingestaltung der Bauteile.

Als „Best Practice“ sei angemerkt, dass im Rahmen der Genehmigungsplanung des Experimentalhochhauses das Sicherheitssystem des Gesamtkonzepts final entwickelt und in einer prüffähigen Dokumentation für den Prüfstatiker aufbereitet wurde. Bestandteile waren sowohl die Funktionen der mechanischen Komponenten als auch sämtlicher Mess- und Regeleinrichtungen und umfassten somit Ergebnisse aus allen am Entwurf des adaptiven Systems beteiligten Disziplinen Tragwerksplanung, Systemdynamik und Maschinenbau. Etwaige Auflagen in der Baugenehmigung sowie Ergebnisse aus der

Gefährdungs- und Risikoanalyse auf Bauteilebene sind bei der finalen Ausarbeitung des Systems zu berücksichtigen. Bild 8.4 beschreibt für die Planungsstadien, für die eine Gefährdungs- und Risikoanalyse vorgeschlagen wird, das jeweilige Ziel und veranschaulicht dieses mit Fehlerfällen, die während der Planung des Experimentalhochhauses identifiziert und hinsichtlich der Fehlerursache und -folge analysiert wurden.

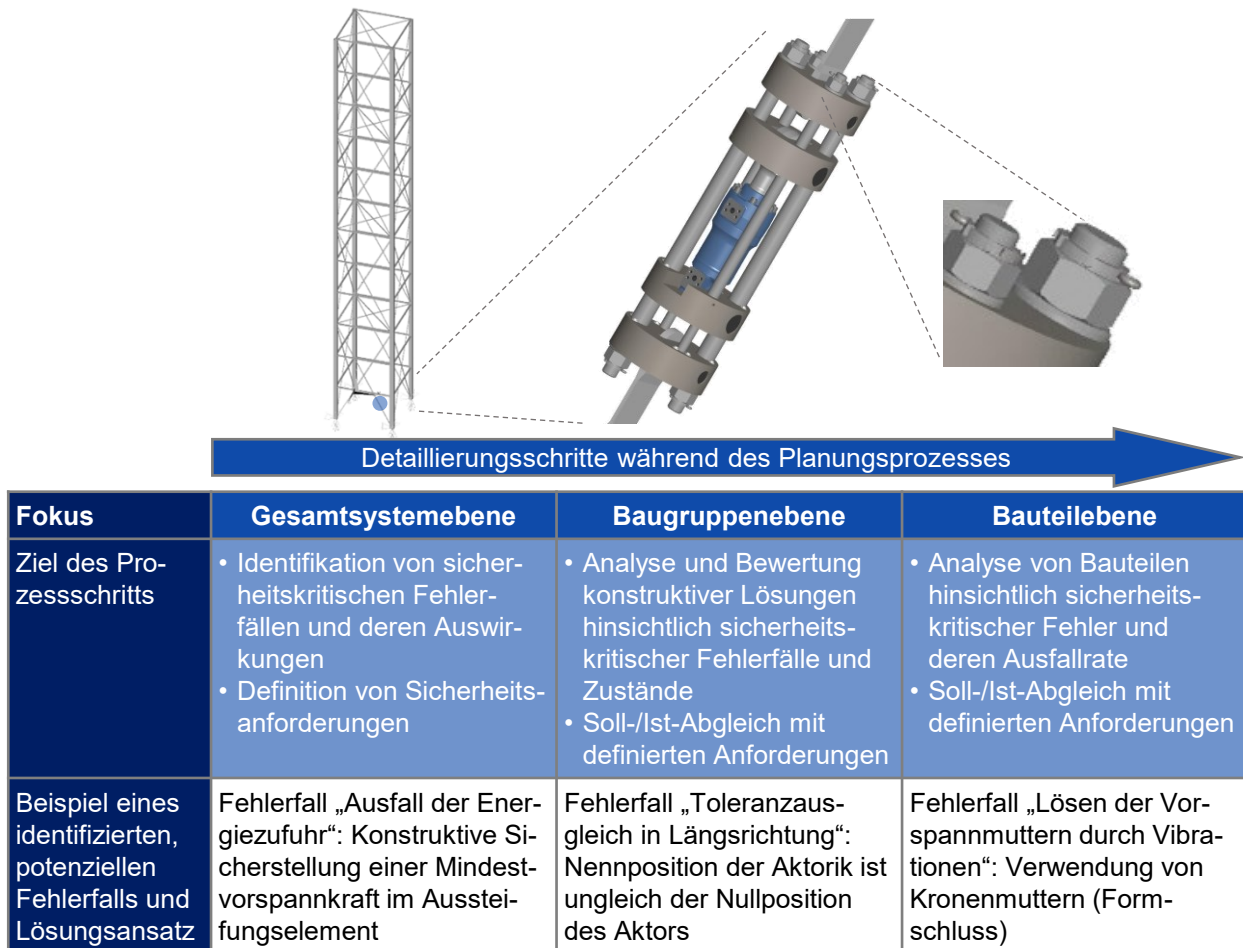


Bild 8.4: Planungsstadien mit jeweils identifizierten und analysierten Fehlerfällen

Vor der Realisierung des Prototyps sind bei der Konzeption der Aktorik für das Experimentalhochhaus innerhalb eines Workshops mögliche Fehlerfälle mittels der Methoden Fehlerbaumanalyse [BERTSCHE04, S. 160 ff.] sowie die Fehler-Möglichkeiten-Einfluss-Analyse (FMEA) [BERTSCHE04, S. 106 ff.] ermittelt worden. Außerdem wurden bei der Realisierung des Tragwerks Prinzipien des Fail-Safe berücksichtigt sowie beim Ausfall einzelner Komponenten vorhandene Redundanzen bewertet. Als weiterer Ansatz dient das Lastmonitoring, eine fortwährende Dokumentation eingetretener Lastfälle. Auf Grundlage der positiven Erfahrungen aus der Anwendung fließen in den Methodenbaukasten Bild 8.2 die System-FMEA, FMEA auf Bauteil- und Baugruppenebene, die Fehlerbaumanalyse sowie die Redundanzanalyse ein. Das prinzipielle Vorgehen wurde als

Bestandteil des Planungsprozesses mit den Evaluationspartnern validiert (vgl. Abschnitt 8.7).

8.4 Requirements Engineering Konzept für die Planung adaptiver Systeme

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.6 erläuterten Potenziale sowie des bei der Planung des Experimentalhochhauses bestätigten Bedarfs ist das Requirements Engineering in der erarbeiteten methodischen Unterstützung zu verankern. Dabei soll auf die in den Grundlagen vorgestellten und bewährten Ansätze aufgebaut und für den Kontext angepasst werden. Zu beantworten ist, wie sich das Requirements Engineering mit den Teilprozessen Anforderungsdefinition und -management bei der Planung adaptiver Systeme anwenden und mittels anwendungsspezifischer Werkzeuge unterstützen lässt.

Dazu ist zu klären, wie die Aktivitäten der Anforderungsspezifikation bzw. des Anforderungsmanagements in den Prozess integriert werden können und vorzuschlagen, in welcher Dokumentenform (vgl. Kapitel 2.6.1.1 und 2.6.1.2) die Anforderungsspezifikation erfolgen soll. Zur Identifikation weiterer benötigter und ggf. zu transferierender Werkzeuge werden die Inhalte von Tabelle 2.2 aus Kapitel 2.6.1.2 hinsichtlich der Anwendbarkeit in diesem Kontext geprüft. Handlungsbedarf wird für die Unteraktivitäten „Anforderungen erheben / ergänzen“ sowie „Anforderungen dokumentieren / strukturieren“ erkannt: In beiden Fällen besteht die in Kapitel 2.6.1.2 vorgestellte „Leitlinie mit Hauptmerkmalen“ nach Pahl und Beitz [FELDHUSEN13C, S. 331] als Werkzeug, deren Inhalte jedoch für technische Systeme des Maschinenbaus bzw. der Produktentwicklung geprägt sind und wie auch die Kriterien der DIN 18205 [DIN 18205 2016] (vgl. Kapitel 2.6.2) nur bedingt eine Schnittmenge mit Anforderungen zur Planung bzw. dem Entwurf adaptiver Tragwerkssysteme aufweisen. Somit ist die Leitlinie mit Hauptmerkmalen zur Unterstützung einer vollständigen Erhebung von Anforderungen für adaptive Tragwerkssysteme zu transferieren. Dieses Werkzeug sowie das für die Anforderungsspezifikation werden nach der Vorstellung der prozessualen Integration in den folgenden Unterabschnitten erläutert.

8.4.1 Prozessuale Integration des Requirements Engineering in die Planung

Entsprechend Kapitel 2.6.1.1 prägen die Kernprozesse Aufgabenklärung bzw. Anforderungsmanagement das Requirements Engineering. Im Planungsprozess (vgl. Bild 8.1) sind die Aktivitäten der Aufgabenklärung bereits enthalten. Die Aufgabenklärung wird durch die Grundlagenermittlung von Architektur bzw. Tragwerksplanung mit Fokus auf

die Nutzung sowie individuellen Randbedingungen des Projekts begonnen. Die interdisziplinäre Anforderungsdefinition an die Integration der Aktorik erweitert die Aufgabenklärung während der Konzeptphase. Die Aktivitäten des Anforderungsmanagements beginnen mit dem Freigeben eines ersten Stands der Anforderungsspezifikation nach der Analysephase und erstrecken sich über alle nachfolgenden Planungsphasen als untergeordneter Querschnittsprozess. Da diese Aktivitäten durch individuelle Änderungen eines jeweiligen Projektverlaufs geprägt sind, lassen sich diese nicht im Prozessdiagramm als eine Aktivität in einem definierten Stadium festhalten. Eine schrittweise Definition von Anforderungen entspricht auch dem typischen, in Kapitel 2.6 vorgestellten Vorgehen in der Produktentwicklung [FELDHUSEN13C, S. 326].

Mit dem Ziel, die Anforderungen kooperativ im interdisziplinären Team erheben und die Vorteile einer stets aktuellen, zentralen Ablage der Anforderungsspezifikation nutzen zu können, wird ein softwarebasiertes Medium zur Anforderungsspezifikation vorgeschlagen. Um Beteiligte von Planungsteams nicht durch ein umfassendes Softwaretool abzuschrecken, sondern den Einstieg in das Requirements Engineering intuitiv zu gestalten und gleichzeitig den Zugriff aus den typischerweise jeweils spezifizierten, örtlich verteilten Planungsbüros zu ermöglichen, wurde die Webapp „Webbasierte Anforderungslisten“ konzipiert und realisiert. Die Funktionalitäten der Webapp fasst nachfolgender Abschnitt zusammen.

Im Prozess kann der Einsatz der Webapp unmittelbar mit der Aufgabenklärung und dem Erheben der Anforderungen beginnen und unterstützt anschließend mittels Funktionen das Anforderungsmanagement. Die Webapp ist somit ein den Planungsprozess begleitendes Werkzeug für den zentralen Austausch der Disziplinen innerhalb des Planungsgeschehens. Die durch die Komplexität der adaptiven Systeme an Bedeutung gewinnende Bedarfsplanung sowie der deshalb geforderte Austausch der Disziplinen in frühen Stadien wird dadurch gefördert und ein integrales Planungsvorgehen unterstützt. Da die Disziplinen Zugriff auf die Anforderungen fachfremder Beteiligter haben, können Schnittstellen gemeinsam definiert, eingesehen und für weiterführende Aspekte aufgegriffen werden.

8.4.2 Webapp zur Unterstützung des Requirements Engineerings

Die Webapp dient dem Ziel, für kleine Entwickler- bzw. Planungsteams eine Plattform zu bieten, die intuitiv anwendbar ist und auf Grundlage des Funktionsumfangs bzw. automatisierter Funktionen die Aufgabenklärung sowie das Anforderungsmanagement unter-

stützt. Die Webapp ist für den globalen Zugriff konzipiert, wurde ursprünglich im Rahmen einer studentischen Arbeit [BESCHERER16] softwaretechnisch umgesetzt und auf einem institutseigenen Server mit weiteren Funktionen erprobt [vgl. HONOLD17B]. Nach einer einmaligen Registrierung können Nutzer Anforderungslisten anlegen und individuell weitere Teilnehmer einladen bzw. bereits registrierte Nutzer für den Zugriff berechtigen. Prinzipiell lässt sich eine beliebige Anzahl an Anforderungslisten anlegen bzw. einrichten. Anschließend öffnet sich eine leere Anforderungsliste, deren Aufbau sich an der Literatur [FELDHUSEN13C, S. 321 f.] orientiert. Der Screenshot in Bild 8.5 veranschaulicht den Aufbau mit exemplarischen Anforderungen aus der Projektarbeit. Das Hinzufügen von Anforderungen wird durch eine Eingabemaske „Neue Anforderung erstellen“ unterstützt, indem das Formular die Eingabe relevanter Angaben wie eines Verantwortlichen erzwingt. Mittels Nutzerverwaltungssystem wird sowohl bei einer neu hinzugefügten Anforderung als auch bei späteren Änderungen automatisch der Zeitpunkt und Name des Bearbeiters hinterlegt.

Anforderungsliste "Adaptives Tragwerk Demonstrator" **KTD**

Startseite Projekte Drucken Exportieren Nutzer einladen Verwaltung **Neue Anforderung erstellen** Logout

F/W	Nr.	Anforderungen	Beschreibung, Quantifizierung	Verantwortlicher	Letzte Änderung			
1 Geometrie								
F	1.1	Abmessungen Stütze ...	Gesamthöhe Stütze: 2360 mm Abmessungen Hohlprofil (Rechteckquerschnitt): 300 x 300 mm Wandstärke Stütze: 10 mm Kopfplatte: 435 x 435 mm Stärke Kopfplatte: 20 mm	WSI	2018-07-03 12:36:04 C. Honold			
F	1.2	Abmessungen Knotenpunkt	Gesamthöhe Knotenpunkt: 600 mm Abmessungen Hohlprofil (Rechteckquerschnitt): 300 x 300 mm Wandstärke: 10 mm Kopfplatte: 400 x 400 mm Stärke Kopfplatte: 20 mm	WSI	2018-07-03 13:08:11 C. Honold			
F	1.3	Abmessungen Zwischenplatte	Außenabmessungen: 400 x 400 mm Stärke: 20 mm Ausschnitt innen bündig mit Innenkontur Rechteckhohlprofil Stütze	WSI	2018-07-03 13:08:12 C. Honold			
F	1.4	Anbindung Aussteifun...	am Knotenpunkt	Z01	2018-07-03 13:08:14 C. Honold			
F	1.5	Anbindung Deckenpaket	am Knotenpunkt	Z01	2018-07-03 13:08:16 C. Honold			
F	1.6	Aktorabmessungen Stütze	125_90 Bosch Rexroth: Durchmesser 235 mm (ohne Schlauchanschlüsse)	IKTD	2018-07-03 13:08:16 C. Honold			
F	1.7	Aktorabmessungen Aus...	125_90 Bosch Rexroth: Durchmesser 235 mm (ohne Schlauchanschlüsse)	IKTD	2018-04-17 19:03:31 C. Honold			
2 Montage								
F	2.1	Austauschbarkeit Tra...	Knotenpunkte sind nicht austauschbar Stützen und Zwischenplatten sind austauschbar	Z01	2018-04-17 18:48:35 C. Honold			

Bild 8.5: Screenshot aus der Webapp „Webbasierte Anforderungslisten“

Zusammengefasst weist die Webapp folgende (weitere) implementierte Funktionen auf:

- Nutzerverwaltung für Zugriffsberechtigung registrierter Anwender

- Kategorisierung von Anforderungen; thematisch (z. B. in Anlehnung an Hauptmerkmale) sowie farblich (z. B. für Priorisierung oder Freigabe)
- Hervorhebung von Anforderungen, die seit dem letzten Login durch andere Projektmitglieder bearbeitet wurden, sowie Benachrichtigungsfunktion per E-Mail
- Chronik zur Nachvollziehbarkeit von Änderungen bzw. Wiederherstellung
- Datenexport als CSV-Datei zur unabhängigen Nutzung der Anforderungen
- Druckfunktion für den Export als PDF-Datei bzw. Ausdruck auf Papier
- Backup-Funktion zur Vermeidung eines Datenverlusts

Die Webapp wurde primär von sieben wissenschaftlichen Mitarbeitern und 26 Studierenden mit Beteiligung von zwei Industrievertretern im Rahmen einer sechsmonatigen Projektarbeit getestet und mittels Fragebogen evaluiert. Anhang A.15 beinhaltet deren Auswertung, die seitens der Nutzer ein positives Fazit hinsichtlich der unterstützenden Funktionen zulässt. Daneben fand die Webapp zu Beginn der Planung des Experimentalhochhauses im Rahmen der Bedarfsermittlung Anwendung, während der die Projektbeteiligten aller Disziplinen eine dreistellige Anzahl an Anforderungen identifizierten. Die Bewertung der Anwendung und der Potenziale der Webapp durch die Evaluationspartner ist in Kapitel 8.7 erläutert.

8.4.3 Sammlung von Hauptmerkmalen zur Identifikation von Anforderungen

Zur Unterstützung der Aufgabenklärung stellt Tabelle 8.2 die in der Produktentwicklung etablierte Hauptmerkmalliste (vgl. Kapitel 2.6.1.2) transferiert für den Kontext adaptiver Tragwerkssysteme dar. Darin sind thematisch abgegrenzte, übergeordnete Hauptmerkmale in der linken Spalte beispielhaften Anforderungen in der rechten Spalte zugeordnet. Entsprechend Tabelle 2.2 dienen die Hauptmerkmale neben dem assoziativen Hervorrufen weiterer Anforderungen auch zur Kategorisierung, sodass das Erarbeiten einer vollständigen und strukturierten Anforderungsspezifikation gefördert wird.

Im Vergleich zu den Kriterien der DIN 18205 [DIN 18205 2016] (vgl. Kapitel 2.6.2) und der Hauptmerkmalliste nach Pahl und Beitz [FELDHUSEN13C, S. 331] ist die erarbeitete Unterstützung für einen speziellen Anwendungszweck bestimmt. Die Hauptmerkmale und zugeordneten Beispiele basieren auf Themen, die während der Planung des Experimentalhochhauses als Anforderung erhoben wurden oder zumindest Gegenstand der Forschungsarbeiten waren. Als Grundlage zur Erfassung einer möglichst umfassenden Auflistung diente das Eruiieren von Ergebnissen aus der Planung des Experimentalhochhauses wie die Bedarfserhebung mit ermittelten Anforderungen, weitere Dokumente der

Planung und Inhalte diesbezüglicher Veröffentlichungen [WEIDNER18, WEIDNER19, BURGHARDT21; BURGHARDT23]. Daneben folgte die Sichtung vom Autor betreuter studentischer Arbeiten der Studiengänge Maschinenbau [SCHOLZ18; JÄGER18] und Architektur mit der Zielsetzung der Konzeption adaptiver Systeme.

Hauptmerkmal	Anforderung
Gebäude	Bautypologie (z. B. Hochhaus); Nutzungsart; Bauform/Kubatur; Gebäudeklasse; Grundfläche; Höhe; Erschließung; Lebensdauer
Tragwerkssystem	Bauweise (Stabwerk/Flächentragwerk); Konstruktionsart (Massiv-/Leichtbauweise); Einflussgrößen; Belastungsfälle (statisch, schwellend, wechselnd); Lastgrößen/Lastamplituden; Verbindungstypen (z. B. gelenkig); Eigenfrequenzen
Tragwerkselemente	Bauteileigenschaften (z. B. Baustoff für Gründung, Stützen, Wände, Balken, Decken); Bauverfahren (z. B. Fertigteilbau)
Konzeption Aktorik	Adaptionsprinzip; Ziel der Regelung (z. B. statische Kompensation von Lastspitzen, Adaption von Steifigkeitseigenschaften, Reduktion von Verformungen); Aktuierungskonzept; Wirkbewegung; Aktorposition(en); Integrationstyp (seriell, parallel, steifigkeitsveränderlich); Krafteinleitung; Stell-/Haltekraft bzw. Amplitude und Frequenz der Aktorkräfte; Vorspannkraft; Stellgeschwindigkeit; Aktuierungshäufigkeit; Auslegungsphilosophie (statisch, zeitfest, dauerhaft); Dämpfungseigenschaften; Energieart (elektrisch, mechanisch, piezo-mechanisch, hydraulisch, pneumatisch); Modularisierung
Geometrie	Bauraumabmessungen und Schnittstellengeometrie für Aktorik; Anschlussmaße; Zu- und Ableitungen; Maßtoleranzen; Grenzmaße für Transport
Regelung	Regelgröße; Zustandsgrößen; Störgrößen; Reglertyp; Regelalgorithmus; Zustandsbeschränkungen (z. B. max. Auslenkung, max. Verformung)
Aktor	Nennposition; Referenzierung; Bauraumabmessungen und Schnittstellengeometrie für Aktor (sowie weitere Anforderungen aus „Konzeption“, sofern aufgrund von Umlenkung, Hebelkonstruktionen etc. abweichend vom eigentlichen Stellelement)
Sensor	Messgröße; Mess-/Wirkprinzip; Messbereich; Messfrequenz/Abtastrate; Auflösung; Messgenauigkeit; Messposition; Sensororientierung und -lage; Abschirmung; Ausgangsgröße/-signal
Regelsystem	Steuerungshardware und -software; Energieversorgung; Rechenfrequenz; Latenz; Datenübertragung; Datenaufzeichnung; Datenvisualisierung; Signallaufzeit; Signalaufbereitung; Datenformate
Betriebsphasen	Normalbetrieb; Standby; Fehlerbetrieb; Notbetrieb; Instandhaltung (Wartungs-, Inspektions- und Instandsetzungsmodus)
Energieversorgung	max. Anschlussleistung; Nennleistungsbedarf; Energiezufuhr; Energiespeicher; Energieeffizienz
Anlagentechnik	Stellfläche für Anlagentechnik (z. B. Regelsystem, Aggregate, Speicher, Pumpen); Leitungsführung
Fertigung und Montage	Fertigungsverfahren; Baugruppenvormontage; Werkstoffeigenschaften; Lieferverfügbarkeit; Normteile; Liefertoleranzen
Robustheit; Resistenzen bzw. Schutz vor Einfluss- u. Störgrößen	Stromausfall; Temperatur; Feuchtigkeit/Nässe; Schwingungen/Erschütterungen; Schmutz/Staub; Insekten/Kleintiere; elektromagnetische Felder; korrosive Medien; Reibung; UV-Strahlung
Sicherheit und Zuverlässigkeit	Sicherheitsanforderungsstufe (SIL-Level); Sicherheitsfaktoren; Redundanzen; Fail-Safe-Prinzipien; Fehlererkennung; Monitoring-Konzept; Ausfallwahrscheinlichkeiten; Fehlerinformation und -übermittlung; unterbrechungsfreie Energieversorgung
Sicherheitsvorkehrung	Brandschutz; Zugriffsschutz; Klemmschutz; Quetschschutz; Lärmschutz; Temperaturschutz; Spannungsschutz; Spritzschutz; Umweltschutz
Wartung/Inspektion/ Instandsetzung	Intervalle; Maßnahmen; Verschleißteile; Verschleißindikatoren; Zugänglichkeit; Ersatzteilverfügbarkeit
Kosten	Herstellung; Montage und Inbetriebnahme; Betrieb; Überwachung; Wartung; Instandhaltung; Aufbereitung für Wiederverwertung
Kontrolle	Normen; Prüfvorschriften; Genehmigung; Funktionstests; Abnahme; Verantwortlichkeiten
Termine	Konzept; Genehmigung; Ausführung; Fertigung/Vormontage; Lieferzeit; Bauausführung und Integration; Inbetriebnahme/Funktionstests/Abnahme

Tabelle 8.2: Hauptmerkmaliste für die Konzeption adaptiver Tragwerkssysteme

Bei der Auswahl bzw. Formulierung der Anforderungen wurde darauf geachtet, dass diese verallgemeinert und nicht projektspezifisch definiert sind. Entsprechend Abschnitt 8.4.1 lassen sich nicht alle durch Tabelle 2.2 adressierten Anforderungen unmittelbar bei der Bedarfsplanung festlegen, sondern sind sukzessive zu konkretisieren.

8.5 Multidisziplinäre Bewertung adaptiver Tragwerkskonzepte

Die im Planungsprozess zentral verankerte Konzeptphase zur interdisziplinären Ideenfindung strebt die beim methodischen Vorgehen möglichst variantenreich gewünschten Lösungskonzepte innerhalb des Lösungsfelds an. Eine zielgerichtete Detaillierung erfordert die Ermittlung eines favorisierten Konzepts [vgl. PAHL07, S. 162]. Es ist daher ein Zwischenschritt notwendig, der gemäß den Hauptschritten der Problemlösung [LINDEMANN09, S. 41] die erarbeiteten Lösungskonzepte analysiert und bewertet, um die favorisierte Lösung zu identifizieren und die Auswahl zu treffen (vgl. Kapitel 2.2.4). Somit ist zu beantworten, wie sich Tragwerkskonzepte multidisziplinär bewerten lassen.

Der an dieser Stelle vorzustellende Bestandteil des Planungsprozesses „Konzeptbewertung und -auswahl“ soll diese Aktivität kontextspezifisch unterstützen. Zur Bewertung von Ideen beinhaltet die Literatur zahlreiche Methoden und methodische Werkzeuge [VDI 2221-1 2019, S. 20; MESSERLE16, S. 2]. Für die Bewertung von Konzeptideen zur Akto-rintegration besteht daher das Ziel, ein etabliertes, möglichst intuitives Verfahren zu transferieren bzw. kontextspezifisch zu prägen. Als Ansatz kann ein einfaches Punktbewertungsverfahren [VDI 2225-3 1998] bzw. alternative Methoden zur Konzeptbewertung (vgl. [VDI 2221-1 2019, S. 20] bzw. Methodenlandkarte in Kapitel 7.5) eingesetzt werden.

Den Neuheitswert bilden die Prozessintegration und die Kriterien zur Bewertung, die zusammen mit einer möglichen Darstellungsform zur Gegenüberstellung von Bewertungsergebnissen in Bild 8.6 veranschaulicht werden. Das Bewertungsvorgehen weist insofern eine Kopplung zum prozessualen Vorgehen auf, dass der architektonische Vorentwurf zunächst als Grundlage für das zu bewertende Tragwerkskonzept einfließt. Dabei ist der Vorentwurf bereits durch wesentliche Randbedingungen wie Standort, Nutzung und Kosten geprägt. Erarbeitete Lösungskonzepte für die Tragwerkssysteme können jedoch auch wieder Einfluss auf den Vorentwurf nehmen, sodass ein Informationsrückfluss bzw. durch Iterieren ein Informationskreislauf entsteht.

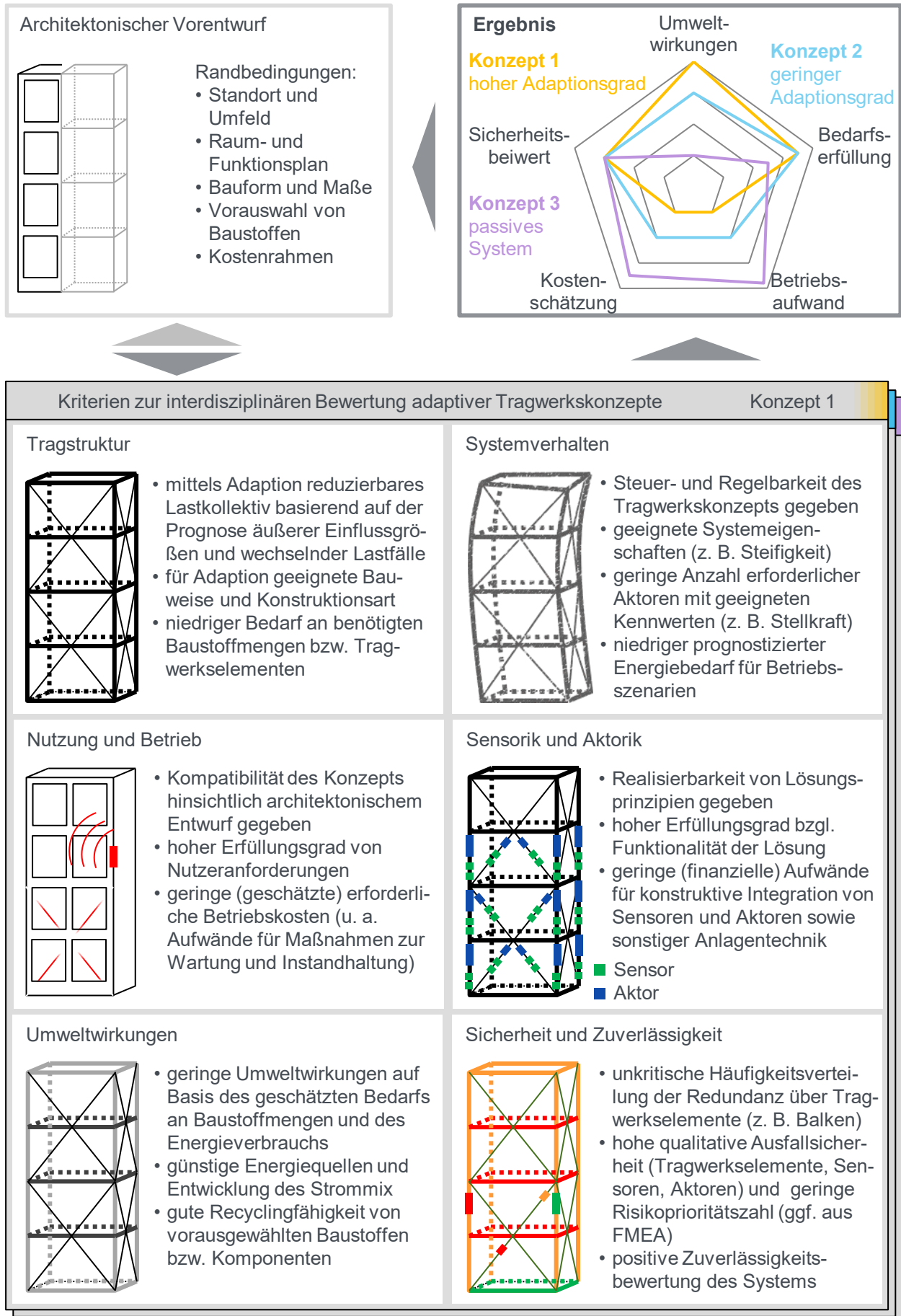


Bild 8.6: Bewertungsansatz und -kriterien für die Bewertung von Tragwerkskonzepten

Die entwickelten Lösungskonzepte lassen sich durch die Expertise an der Bewertung beteiligter Disziplinen analysieren und deren Eigenschaften anhand verschiedener Kriterien operationalisieren. Die in der Visualisierung aufgenommenen übergeordneten Bewertungsfelder (Tragstruktur, Systemverhalten, Nutzung und Betrieb, Sensorik und Aktorik, Umweltwirkungen, Sicherheit und Zuverlässigkeit) als auch die untergeordneten Kriterien sind als Beispiele zur Veranschaulichung oder als erste Grundlage zu verstehen. Aufgrund projektabhängiger Gegebenheiten können diese keinen Anspruch auf Vollständigkeit erfüllen und sind für den Bewertungsfall individuell zu ergänzen. Weitere Kriterien lassen sich z. B. mit Hilfe der Hauptmerkmalliste in Kapitel 8.4.3 ableiten.

Neben Kriterien, die im Tragwerksentwurf, beim Entwurf von Regelalgorithmen bzw. bei der Konzeption der Aktorik z. B. mittels erster Modellierung und durch Simulationsergebnisse quantifizierbare Eigenschaften des jeweiligen Lösungskonzepts berücksichtigen, sind auch Kriterien mit qualitativen Eigenschaften einzubinden, die z. B. die Kompatibilität des Konzepts hinsichtlich des architektonischen Entwurfs betreffen. Ferner sei angemerkt, dass zu einzelnen Bewertungsaspekten für eine tiefgehende Bewertung Methoden und Bewertungskriterien derzeit noch Forschungsgegenstand sind. Für die Bewertung der Umweltwirkungen wird auf den Ansatz in Kapitel 8.3.3 verwiesen.

Lösungskonzepte können verschiedene Adaptionsprinzipien sowie verschiedene Adaptionsgrade aufweisen. Für letztere eignet sich die Gegenüberstellung besonders, da neben Schätzungen zu den reduzierten Umweltwirkungen auch die höheren Aufwände und Risiken auf einen Blick erfassbar werden. Das in Bild 8.6 dargestellte Netzdiagramm vergleicht visuell Stärken und Schwächen von Lösungskonzepten und unterstützt so die projektspezifische Auswahl eines geeigneten bzw. favorisierten Konzepts. Das vorgeschlagene Punktbewertungsverfahren dient dabei als Hilfsmittel, um für jedes Bewertungskriterium quantifizierbare bzw. qualitative Eigenschaften der Konzepte in einen Vergleichsmaßstab bzw. das Netzdiagramm zu überführen. Gemäß VDI 2225-3 [VDI 2225-3 1998, S. 4] ist dazu für jedes Kriterium eine Punktbewertungsskala zu erstellen, die von 0 Punkten für einen unbefriedigenden Erfüllungsgrad eines Konzepts bis zu einer einheitlichen Maximalpunktzahl im Fall einer idealen Erfüllung einen Punktwert vorgibt. Mittels Mittelwertbildung lassen sich anschließend die Punktwerte der Kriterien innerhalb der Bewertungsfelder zusammenfassen.

Um nur prinzipiell in Frage kommende Lösungen den Aufwänden der Bewertung zu unterziehen, geht der Bewertung eine Vorauswahl voraus [PAHL07, S. 162]. Als Maßstab dient die Erfüllung der gestellten Basisanforderungen, die sich gesammelt mit Hilfe einer

Auswahlliste [PAHL07, S. 163] in Form einer Checkliste überprüfen lassen. Die Kriterien des Bewertungsansatzes repräsentieren somit idealerweise Leistungsanforderungen und ermöglichen anhand der Ausprägungen der Lösungen die Vergleichbarkeit.

8.6 Abbildung des Planungsvorgehens als Vorgehensmodell

Dieses Unterkapitel widmet sich der Forschungsfrage, ob sich der vorgestellte Planungsprozess in einem abstrahierten Vorgehensmodell abbilden lässt und welche Analogien zu verwandten Vorgehensweisen bestehen. Abschnitt 8.6.1 stellt zur Beantwortung zunächst das vorgestellte Planungsvorgehen den in Kapitel 2.2.2 erläuterten Vorgehensmodellen der Produktentwicklung sowie den Phasen der HOAI gegenüber. Als Resultat wird in Abschnitt 8.6.2 das V- bzw. W-Modell für die Planung adaptiver Tragwerke transferiert. Gemäß den Definitionen von Bestandteilen systematischen Vorgehens in Kapitel 2.1.3 ist zwischen dem bisher vorgestellten Prozess mit Zuordnung von Aktivitäten zu jeweiligen Disziplinen und den im Vergleich dazu verallgemeinerten Vorgehensmodellen zu unterscheiden.

8.6.1 Gegenüberstellung des Prozesses zu bestehenden Vorgehensmodellen

Für die nachfolgende Diskussion ist der in Bild 8.1 vorgestellte Prozess mit den in Abschnitt 8.2.2 erläuterten Prozessphasen noch stärker abstrahiert zu betrachten. Auf dieser Basis sind die nachfolgend erläuterten Analogien bzw. Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede zu den in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Vorgehensmodellen zu verstehen.

Wie bereits in Abschnitt 8.2 erläutert, sind die Phasen des Planungsprozesses in Anlehnung an die der Richtlinie VDI 2221 [VDI 2221-1 2019, S. 16] sowie den Leistungsphasen der HOAI [HOAI13, Anlage 10] benannt. Entsprechend der ähnlichen Benennung zeigen die drei Vorgehensweisen Analogien hinsichtlich der Absicht der jeweiligen Phasen, wobei der Zielsetzung entsprechend die Ausgestaltung des entwickelten Prozesses anwendungsspezifisch geprägt ist. Alle Vorgehensweisen beginnen mit der „Analysephase“ (Wortlaut des entwickelten Prozesses) bzw. dem „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“ (VDI 2221) zur „Grundlagenermittlung“ (Vorgehen nach HOAI). Während des „Vorentwurfs“ (HOAI) bzw. der „Konzeptphase“ (entwickelter Prozess) erfolgt das „Konzipieren“ (VDI 2221) von Lösungsansätzen bzw. -konzepten. In allen Vorgehensweisen knüpft (überlappend) das „Entwerfen“ (VDI 2221), die „Entwurfsplanung“ (HOAI) bzw. die „Entwurfsphase“ an. Die für die Herstellung bzw. Realisierung erforderliche weitere Detaillierung ist das Ziel in der Ausarbeitungsphase (entwickelter Prozess sowie auch VDI 2221) bzw. der Ausführungsplanung (HOAI). Entsprechend der Leistungsphasen der

HOAI - und abweichend zum Vorgehensmodell der VDI 2221 - setzt der entwickelte Prozess fort. Im entwickelten Prozess ist allerdings die Leistungsphase „Vorbereitung der Vergabe“ der Ausarbeitungsphase zugeordnet. Außerdem werden die Leistungsphasen „Vergabe“ und „Objektüberwachung, Bauüberwachung und Dokumentation“ im entwickelten Prozess als „Realisierungsphase“ zusammengefasst und die „Objektbetreuung“ der „Nutzungs- und Betriebsphase“ zugeordnet.

Auch zum V-Modell der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (VDI 2206) sowie dem W-Modell zur Entwicklung adaptronischer Systeme lassen sich Parallelen erkennen. Aufgrund des Ursprungs des W-Modells im V-Modell (vgl. Kapitel 2.2.2.3) wird im Weiteren auf das V-Modell referenziert und nur die Unterschiede aufgegriffen.

Die Analysephase zur Grundlagenermittlung, die schrittweise Anforderungsdefinition sowie die anknüpfende Konzept- und Entwurfsphase des entwickelten Prozesses können als die linke Seite des V-Modells mit den Aktivitäten Produktdefinition und Systementwurf [VDI 2206 2004, S. 29 f.] aufgefasst werden. Nachfolgend weist der Prozess wie im V-Modell disziplinenübergreifende Bestandteile („Konzeption der Actorintegration“) auf, die bei weiter detaillierenden Schritten im V-Modell in disziplinspezifische Aktivitäten mit der Bezeichnung „domänenspezifischer Entwurf“ übergehen und im entwickelten Prozess durch parallele Aktivitäten des Entwurfs dargestellt sind. Im V-Modell ist die Suche und Festlegung eines „domänenübergreifenden Lösungskonzepts“, das heißt die Konzeptphase, Bestandteil des „Systementwurfs“ [VDI 2206 2004, S. 29].

Ein Unterschied beider Modelle ist das beim Prozess für adaptive Tragwerkssysteme früh erarbeitete erste architektonische Konzept, da eine solche „Vorarbeit“ im V-Modell (bei einmaligem Durchlaufen) nicht Bestandteil ist. In allen Modellen stellt die Modellbildung und Analyse (von Abhängigkeiten) die Basis für die nachfolgende Systemintegration und Verifikation dar. Der entwickelte Prozess und das W-Modell unterscheiden sich zum V-Modell mit der Gemeinsamkeit, dass die Integration und Verifikation wiederholt erfolgen. Während dies beim W-Modell für die intensivere Lösungsabstimmung vorgesehen ist (siehe Kapitel 2.2.2.3), sind beim Planungsprozess bereits für die Genehmigung ein disziplinenübergreifender Entwurfsstand zusammenzufassen. Dies entspricht einer Integration der Teilergebnisse in den gemeinsamen Entwurf, wodurch im Sinne einer Validierung deren Kompatibilität zueinander geprüft wird.

Neben der Genehmigung stellt auch die Ausschreibung ein Element dar, das in den Vorgehensmodellen der Produktentwicklung kein Bestandteil ist. Die Integration und Validierung der Ergebnisse vor der Ausschreibung entspricht dem Zweck der Systemintegra-

tion des V-Modells, um die disziplinspezifischen Teilsysteme zu einem Gesamtsystem zusammenzufügen und hinsichtlich des Zusammenwirkens und der Erfüllung der Anforderungen zu prüfen. Dieser Rückschluss dient wiederum der zugrunde gelegten Eigenschaftsabsicherung (vgl. Kapitel 2.2.2.3).

Während das Vorgehen nach VDI 2221 und das V-Modell der VDI 2206 im Rahmen eines Entwicklungsprojekts mehrfach durchlaufen werden kann [VDI 2221 1993, S. 8; VDI 2206 2004, S. 30], ist der im Rahmen der Arbeit entwickelte Prozess als Makroprozess zu verstehen und innerhalb eines Planungsprojekts nicht für die wiederholte Anwendung ausgestaltet. Jedoch lässt sich für die Softwareentwicklung des Steuerungs- und Regelungssystems sowie auch ggf. für die Entwicklung von Prototypen der Aktorik das V-Modell als eingeschobener, eigenständiger bzw. untergeordneter Mikroprozess durchführen - auch in wiederholter Anwendung.

8.6.2 Transfer des W-Modells für den entwickelten Planungsansatz

Vorgehensmodelle basieren in der Regel auf den Erkenntnissen eines wiederholt durchgeführten Prozesses, um durch beobachtete, erfolgsverzeichnende und somit wiederkehrende Vorgehensmuster Handlungsempfehlungen auszusprechen [LINDEMANN09, S. 36]. Für die Entwicklung eines Vorgehensmodells ist folglich ein Prozess notwendig, der abstrahiert wird. Aufbauend auf die Diskussion der Gemeinsamkeiten des entwickelten Prozesses zu den Prinzipien der Vorgehensmodelle in Abschnitt 8.6.1 wird im Folgenden angestrebt, auch ohne vorherige wiederholte Anwendung des Prozesses ein Vorgehensmodell zur Veranschaulichung der prozessualen Vorgehensweise abzuleiten.

Auf Basis der identifizierten Merkmale des entwickelten Planungsprozesses, zu denen insbesondere die zweimalige Integration und Validierung zählt, und dem Ziel, wie im V- bzw. W-Modell die Eigenschaftsabsicherung abzubilden, wird das W-Modell als Grundlage für das Vorgehensmodell herangezogen. Das Ergebnis fasst Bild 8.7 in Form eines Vorgehensmodells für die Planung adaptiver Tragwerkssysteme zusammen, das ausgehend vom vorgestellten W-Modell auf die vorliegenden Randbedingungen transferiert wurde.

Das transferierte W-Modell beginnt wie der Planungsprozess nach dem Aufkommen eines Planungsbedarfs. Zusammengefasst repräsentiert der linke abfallende Strang die Systemanalyse und den Systementwurf, der die Grundlagenermittlung (Analyse) und die Erarbeitung eines architektonischen Konzepts als Vorentwurf beinhaltet. Letzterer dient

als Basis für die nachfolgende gemeinsame Anforderungsdefinition und Konzeption der Aktorintegration.

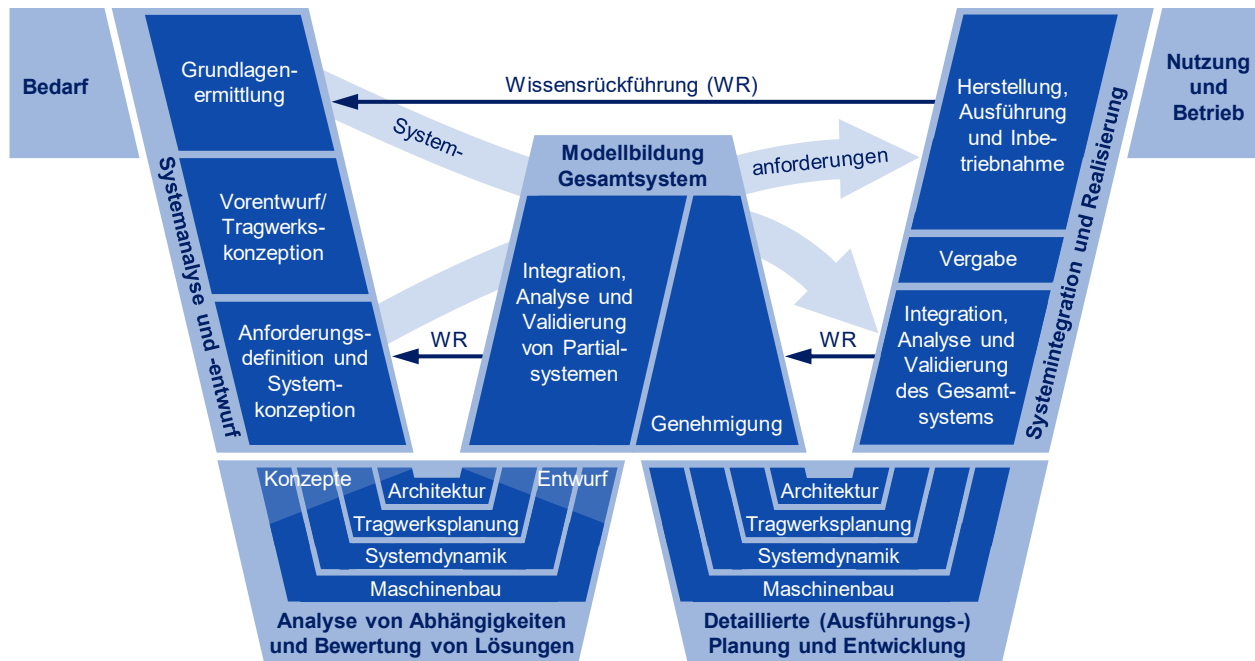


Bild 8.7: Transferiertes W-Modell für die Planung adaptiver Tragwerkssysteme

Der Phase Systemanalyse und -entwurf schließt sich die erste Detaillierungsphase an, in der die Analyse von Abhängigkeiten und die Bewertung von Lösungen im Stadium von Konzepten erfolgt, die dann innerhalb der Disziplinen zum Entwurf ausdetailliert werden. Zwischen dem linken abfallenden und dem rechten aufsteigenden Strang liegt die wesentliche Motivation für die Gestaltung als W-Modell. Die von Anderl [ANDERL12, S. 2] vorgeschlagenen Phasen für die Prä-Validierung ähneln in der prinzipiellen Zielsetzung der Zusammenfassung von Ergebnissen aller Disziplinen im Entwurf, der abschließend die Grundlage zur Genehmigungsplanung darstellt. Bei der ersten Integration und Validierung in der „Mitte des W-Modells“ lässt sich der Planungsstand direkt hinsichtlich der Systemanforderungen zur Absicherung der Eigenschaften prüfen. Die Pfeile der Systemanforderungen stellen deren Reifeprozess im Rahmen des Requirements Engineering als auch den Informationsfluss für die spätere Validierung der Lösungen dar.

In der Praxis wird von einem positiven Genehmigungsbescheid ausgegangen, sodass nach der Einreichung der Genehmigungsplanung direkt wieder auf detaillierter Ebene eingestiegen und mit der Ausführungsplanung der Entwurf weiter ausgearbeitet wird. Eventuelle Auflagen der Genehmigung sind nach Bekanntwerden zu integrieren.

Der rechte aufsteigende Ast bündelt die Aktivitäten der Systemintegration und Realisierung. Nach der Zusammensetzung zum Gesamtsystem mit finalem Systemabgleich mit

den Anforderungen folgt die (Ausschreibung und) Vergabe, woraufhin die Bauausführung beginnt. Das Modell endet mit dem Übergang in die Nutzung und den Betrieb.

Wie in Abschnitt 8.2.1 begründet, liegt die vorwiegende Aufgabe der Disziplinen Umweltbewertung und Sicherheitstechnik in der Analyse und Beratung. Diese sind daher in den disziplinspezifischen Phasen nicht explizit genannt.

Das W-Modell weist mittels zweier Pfeile bewusst auf eine Wissensrückführung aus den Phasen der Validierung auf die der Spezifikation (zukünftiger Planungen) hin, um ein Denken in Kreisläufen [vgl. BERGMANN13, S. 22] zu fördern, allgemein Fehler nicht wiederholt zu begehen und das Know-how für zukünftige Planungsprojekte zu erhöhen.

8.7 Evaluation des Prozesses

Die Evaluation ist in drei Unterkapitel gegliedert. Kapitel 8.7.1 beschreibt zunächst die Zielsetzung, das Vorgehen sowie Anmerkungen zum Verständnis. Kapitel 8.7.2 stellt die Ergebnisse vor. Entsprechend der Modularität der entwickelten Unterstützung werden die Bestandteile in Abschnitte untergliedert vorgestellt. Kapitel 8.7.3 fasst die Evaluation zu den Inhalten von Kapitel 8 zusammen.

8.7.1 Zielsetzung und Vorgehen der Evaluation

Entsprechend der Evaluation in vorangegangenen Kapiteln erfolgte zunächst die Vorstellung der in diesem Kapitel erarbeiteten Ergebnisse gegenüber den Evaluationspartnern. Dabei wurden die Module nacheinander erläutert und dabei der Planungsprozess aus Abschnitt 8.2 schrittweise aufgebaut. Die Dokumentation der jeweiligen Beurteilung basiert auf der Beantwortung der Fragen 9 bis 25 des Evaluationsfragebogens (siehe Anhang A.5) sowie festgehaltenen ergänzenden Anmerkungen. Entsprechend sind die nachfolgenden Evaluationsergebnisse der Module in den Abschnitten 8.7.2.1 bis 8.7.2.5 abweichend zur Struktur von Kapitel 8 aufgeführt. Abschnitt 8.7.2.6 fasst das Meinungsbild der Evaluationspartner als übergreifendes Fazit zusammen und Abschnitt 8.7.2.7 beschreibt in Form eines komprimierten Ausblicks die Potenziale, die durch die Evaluationspartner hinsichtlich einer Weiterentwicklung identifiziert wurden. Anhand geeigneter Aussagen der Evaluationspartner wird mittels Klammerangaben auf die Erfüllung einzelner Anforderungen referenziert, die in Kapitel 6.3 im Rahmen der Anforderungsdefinition abgeleitet wurden. Abschnitt 8.7.3 zieht bezüglich der Erfüllung der Anforderungen ein Resümee.

8.7.2 Diskussion der Evaluationsergebnisse

Um die Aussagen der Evaluationspartner durch eine Zusammenfassung möglichst wenig zu verfälschen, wird für die folgenden Abschnitte ein Diskussionsstil mit der Übernahme einiger Zitate gewählt. Wortwörtlich übernommene Formulierungen sind mit Anführungszeichen gekennzeichnet. Um die Anonymität der Evaluationspartner zu wahren, werden Anmerkungen zum Teil ohne Nennung der zugehörigen Disziplin und im Allgemeinen mit Verwendung der maskulinen Form erläutert.

8.7.2.1 Integration der LCA-Methodik

Auf die Frage (9), inwiefern die LCA-Methodik zur systematischen Reduktion von Umweltwirkungen während der Planung anwendbar ist, wurde die grundsätzliche Anwendbarkeit einstimmig von allen Evaluationspartnern bestätigt. Eine wesentliche Herausforderung stellt aus Sicht der Systemdynamik die Prognose der Nutzungsphase dar, da die Methode zwar auf Annahmen beruht, aber genauere Kenntnisse bezüglich auftretender Lasten zu höherwertigen Bewertungsergebnissen führen. Dabei ist zu bedenken, dass die Umgebungseinflüsse über einen Zeitraum der Standzeit des Tragwerks – in der Regel in der Größenordnung von 100 Jahren – Berücksichtigung finden. Auch weitere Eingangsgrößen sind durch Abhängigkeiten von Entscheidungen verkettet.

Jedoch ist noch zu beantworten, welche in die Bewertung einfließenden Annahmen die dominierenden Größen darstellen und inwiefern bei den zu bewertenden Varianten große Unterschiede im Bewertungsergebnis resultieren. Die Bewertung „soll keine Genauigkeiten suggerieren, die nicht vorhanden sind“. Zumindest Tendenzen ließen sich mit der Methode identifizieren. Aus Sicht der Architektur müssen sich die Ergebnisse zügig ermitteln lassen, um das Entwurfsvorgehen nicht zu verzögern.

Aus Sicht der Tragwerksplanung stellt die Anwendung, bis die Methode etabliert ist, einen höheren Mehraufwand bei der Planung dar, da wesentliche Kennwerte für den Betrieb, aber auch Kosten noch unbekannt sind und auch Zielwerte in Form einer Messlatte für positive Beispiele fehlen. Die Planer bestätigen jedoch, dass in der gängigen Praxis auf Erkenntnisse zur Nachhaltigkeit vorangegangener (konventioneller) Projekte aufgebaut wird und auf Grundlage dieser Erfahrung die Anwendung der Methode als „realisierbar“ zu bezeichnen ist. Bisher „macht’s aber keiner (auf solch systematische Weise)“. Stattdessen findet in der Tragwerkskonzeption der Vergleich von Varianten statt, wie z. B. die Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen einer Ausführung aus Holz zu einer Variante

aus Stahl oder Stahlbeton. Aufgrund des Aufwands ist die Entscheidung (wie vorgesehen) im Stadium der Konzeptphase anzustreben.

Frage 10, inwiefern mit Hilfe der vorgestellten LCA-Methodik Umweltwirkungen während der Planung reduziert werden können, beantworten die Evaluationspartner mit Bezug auf den Vergleich von Varianten und folglich entsprechend der zugrunde gelegten Zielsetzung. So lasse sich bewerten, ob ein adaptives Konzept als Option bei der Planung berücksichtigt werden sollte und auch welche Materialität, wie z. B. ein Holztragwerk, geeignet ist. Die Bewertung sei von hoher Bedeutung, da sonst die Zielsetzung adaptiver Gebäude verfehlt werden könnte. Aufgrund von Projekten mit unterschiedlichen Randbedingungen sollte daher „auch immer individuell“ die Bewertung vorgenommen werden. Durch die Bewertung ab den frühen Phasen lassen sich nachhaltige Gebäude zielgerichteter realisieren und die LCA sensibilisiere bei wichtigen Entscheidungen hinsichtlich der Umweltwirkungen (→ Erfüllung von Anforderung 13). Empfohlen wird die Diskussion der Ergebnisse und potenzieller Änderungen in interdisziplinärer Runde, sodass die Optimierung des Konzepts gemeinschaftlich und mit dem „oberen Ziel Gesamtnutzen“ angegangen wird. Die Methodik „sollte unbedingt frühzeitig berücksichtigt werden“, es bleibe jedoch noch ungeklärt, zu welchem Zeitpunkt mit welchen Planungsinformationen genau eingestiegen werden kann.

Die Evaluationspartner sehen für zukünftige Anwendungen der LCA-Methodik auch weitere Unterstützungspotenziale (Frage 11). So werden durch die Anwendung relevante Informationen zwangsläufig innerhalb des Teams benötigt bzw. eingefordert und so die Planung vorangetrieben. Außerdem wird durch die Bewertung auch aufgezeigt, wie vermeintlich kleine Konzeptänderungen innerhalb einer Disziplin sich auf die Gesamtebene auswirken können. Beispielsweise zeigte die Auswahl des Korrosionsschutzverfahrens für Tragwerkselemente des Hochhauses einen überraschend hohen Einfluss.

Allgemein wurde von den Evaluationspartnern der Baupraxis darauf hingewiesen, dass „der Markt entscheidet, was gebaut wird“ und „ob die Bewertung notwendig ist“ bzw. „das Produkt entsprechend nachhaltig gestaltet werden muss“. Letztendlich „spielt das Thema Kosten eine dominierende Rolle – aber dies ist ein richtiger Ansatz“ und auch aus Sicht der Architektur „anwendbar“. Das Vorgehen wird durch marktwirtschaftliche Aspekte getragen und dürfte als „essenzieller Ansatz“ schnell an Relevanz gewinnen, wenn die Nachfrage steigt und sich z. B. die bereits in der Politik diskutierte CO₂-Steuer auf die Bauweise von Gebäuden ausweitet bzw. auf deren Planung auswirkt.

Darüber hinaus wurde angemerkt, dass es aus Bauherrensicht einen Koordinator in Form eines Gutachters benötigt, der im Rahmen dieses Fachgebiets beratend mitwirkt. Das Thema sei für typisch ausgebildete Planer sehr umfassend und komplex sowie bezüglich des notwendigen Verständnisses anspruchsvoll. Erfahrungen zeigen, dass bei Bauprojekten mit Nachhaltigkeitsfokus bereits andere wesentliche Punkte „in den Hintergrund geraten sind“. Bei Projekten erfolge bisher eine Gewichtung der Probleme, wobei die LCA derzeit „häufig ein Einsparpotenzial“ darstellt.

Zur Effizienzsteigerung biete sich die Kopplung des Ansatzes mit BIM an. Dazu werden die ohnehin im BIM-Modell hinterlegten Daten direkt in ein Bewertungstool einbezogen und durch fehlende Daten, wie beispielsweise die Stellgrößen der Aktuierung (siehe Kapitel 5.1), ergänzt. Schlegl et al. [SCHLEGL19A, S. 21] und Van den Adel [VAN DEN ADEL21] verweisen ebenfalls auf den Ansatz.

8.7.2.2 Prozess für die Planung adaptiver Tragwerkssysteme

Als Einstieg zur Evaluation des entwickelten Planungsprozesses wurde den Evaluationspartnern die Frage (12) gestellt, ob der Prozess die angestrebte interdisziplinäre Zusammenarbeit sicherstellt. Alle Antworten bestätigten dies („definitiv“ / „auf jeden Fall“) mit den Begründungen, dass „Kommunikation und Aufgaben klar sind“ und der Planungsprozess „deutlich“ zeige, „dass die interdisziplinäre Zusammenarbeit notwendig ist und auch wer und wann“ zusammenarbeiten (→ Anf. 9) bzw. sich austauschen (→ Anf. 10) muss. Der Prozess stelle „definitiv die gewünschte interdisziplinäre Zusammenarbeit sicher“, die insbesondere dank der Querbalken zur Integration bzw. Validierung forciert wird.

Angemerkt wurde, dass (zu) viele Querverbindungen irritieren, aber „vermutlich notwendig“ sind. Um die Übersichtlichkeit zu steigern, wurde als Erweiterung vorgeschlagen, für jeden Akteur individuell den Prozess anzufertigen. Bei letzterem sei jedoch zu hinterfragen, inwiefern dann das Zusammenspiel der Disziplinen noch ersichtlich bleibt.

Bei der Frage 13, ob der Prozess in dem gewählten Abstraktionsgrad vollständig definiert ist oder ein Schritt fehlt, wurde auf eine in der vorgestellten Version aufgenommene Ergänzung hingewiesen. Alle weiteren Evaluationspartner bestätigten nach einer Prüfung die Vollständigkeit („im gewählten Abstraktionsgrad“). Aus Sicht der Tragwerksplanung ist „die dargestellte Zusammenarbeit mit der LCA und der Systemdynamik absolut richtig“ (→ Anf. 8). Allgemein könnten die Pfeildarstellungen längerfristig und verallgemeinert durch Erfahrungswerte weiterer Projekte noch präzisiert werden, um zu beschreiben,

welche Informationen sich hinter den Pfeildarstellungen verbergen. Gemeint sind dabei Ergebnisse bzw. Dokumente und zugehörige Formate (→ Anf. 9).

Bei weiterer Ausarbeitung des Prozesses, über den bisherigen Fokus der technischen Realisierbarkeit hinaus, sind auch die Aspekte, die den Kunden bzw. Bauherrn betreffen, aufzunehmen. Die Vertreter der Baupraxis weisen explizit auf die fehlende Betrachtung von Kosten hin.

Mit einem einstimmigen „ja“ wurde Frage 14 beantwortet, ob die einzelnen Schritte des Planungsprozesses zueinander passen. Der Ansatz und das Ergebnis werden als „richtig“, „nachvollziehbar“ sowie „plausibel“ bezeichnet – „die Darstellung ist schlüssig“ (→ Anf. 1). Aus Sicht der Architektur ist die Integration der Aktorik im Vorentwurf ein „wichtiger und richtiger Bestandteil“ (→ Anf. 3). In der Regel beginnen bisher die Aktivitäten der Tragwerksplanung während des architektonischen Vorentwurfs. Die Aktivitäten der Systemdynamik und des Maschinenbaus sollten gegebenenfalls „noch früher anfangen, sobald die Gebäudetypologie feststeht, um den Nutzen der Adaptivität zu eruieren“ (→ Anf. 4 bzw. 8). Die Umweltbewertung könnte dann erst später (wie vorgeschlagen) beginnen, „wenn die Grundform entsteht“. Aus Sicht der Tragwerksplanung passen die einzelnen Schritte ausdrücklich aufeinander und sind auch „nicht zu weit vom traditionellen Ablauf nach der HOAI entfernt“ (→ Anf. 2).

Frage 15 lautet, inwiefern der Prozess in der vorliegenden Form durchgeführt werden kann. Die Antworten der Evaluationspartner beinhaltete diverse Einzelmeinungen. Der Prozess könne „in der Form“ „bei der nächsten Anwendung“ durchgeführt werden. Es werden weiterhin (geplante) Iterationen erwartet, die sich im Prozess nicht abzeichnen (lassen) und die insbesondere die Konzeptphase betreffen (→ Anf. 5). Außerdem „sollte die Anwendung möglich sein, wenn für alle Schritte die Werkzeuge vorliegen“ (→ Anf. 7 bzw. 12). Das vorgestellte Ergebnis dient „als Übersicht über den komplexen Prozess“. Eine detailliertere Beschreibung sei aufgrund des Umfangs der Aktivitäten nur auf Subebene möglich, z. B. mittels Schnittstellenbeschreibung. Die allgemeine Beschreibung der Aktivitäten fördere jedoch die breite Anwendbarkeit (→ Anf. 9).

Auch auf Frage 16, inwiefern der Prozess eine Unterstützung für zukünftige Planungsprojekte adaptiver Tragwerke darstellt, urteilten die Evaluationspartner positiv. Der Prozess ist eine „gute Unterstützung in Form einer Basis für die Planungsorganisation“, „beim nächsten Projekt eine Grundlage“, mit welcher „Schnittstellen klar werden“ und sich hinsichtlich der „zu beachtenden Faktoren als Überblick“ eignet. Die Darstellung „gibt den Rahmen des Projekts vor und zeigt Anknüpfungspunkte der Disziplinen auf“ (→ Anf. 9

und 10). Insgesamt resultiert durch die Unterstützung „eine Zeit-/Kosten-/Aufwandserparnis“. Ein Evaluationspartner mit der Rolle eines Koordinators bestätigt darüber hinaus, dass auch das „Ablesen des aktuellen Planungsstands möglich“ ist. Ein Vertreter der Architektur bekräftigt, dass der Prozess eine große Hilfe darstellt, um Geld, Zeit und Koordinationsaufwand einzusparen. „Somit ist die Unterstützung gegeben, dass die Schritte und das Vorgehen für nächste Projekte durch den Prozess vorgeschlagen bzw. empfohlen werden. Mit dem Prozess wäre es (bei der Planung des Experimentalhochhauses) vermeidbar gewesen, den Vorentwurf, die Entwurfsphase sowie das Baugesuch nochmals mit nachträglich integrierter Aкторik zu wiederholen“ (→ Anf. 1 bzw. 3). Bei der Planung des Experimentalhochhauses war für viele Beteiligte „unklar, was der nächste Schritt war“, welche Tatsache zukünftig durch den Prozess vermieden werde.

In der weiteren Diskussion wurde angemerkt, dass der Prozess auf die notwendige Zusammenarbeit fokussiert, die angestrebte Zusammenarbeit aber in der Regel von den beteiligten Personen abhängt. Weiterhin sind für die Situation die „passenden Prozessschritte“ und „passende Methoden“ im Einzelfall abzuwägen. Außerdem führte eine schrittweise definierte Prozessbeschreibung bereits zu Diskussionen, inwiefern diese die (architektonische) Kreativität beeinflusst, die weiterhin erhalten bleiben muss. Auch die Aкторplatzierung ist „noch kein Selbstläufer, weiterhin sind intensive Abstimmungen mit der Tragwerksplanung notwendig“.

Bei der Erstellung des Sicherheitskonzepts ergab sich die Frage, wer die (Sicht-) Prüfungen an Bauteilen bei der Inbetriebnahme und im Betrieb übernimmt. „Bisher wurden Tragwerke einmal errichtet und waren für die Lebensdauer thematisch abgeschlossen.“ Bei adaptiven Tragwerken werden ähnlich wie bei Fahrzeugen Inspektionen und Gutachten wie die Hauptuntersuchung notwendig.

Bei der Planung öffentlicher Gebäude werden sukzessive Mittel unter der Voraussetzung freigegeben, dass der Planungsstand und die verfügbaren Kosten eine Ausführung ermöglichen. Diese und auch die Frage bezüglich der Verantwortung und Zuständigkeit für den Betrieb des Gebäudes und der Steuer- und Leittechnik bleiben im Prozess bisher unberücksichtigt. Darüber hinaus zeigt die Erfahrung, dass die Inbetriebnahme von konventionellen Gebäuden mit umfassender technischer Ausstattung bereits heute einige Monate bzw. Jahre erfordert. Auch „diese Phase sollte (längerfristig) im Prozessdiagramm näher untersucht und berücksichtigt werden“ (→ Anf. 6).

Von Seiten der Systemdynamik wurde darauf hingewiesen, dass die Disziplin zukünftig nicht zwangsläufig für die Konzeption bzw. Planung des Hydraulikkonzepts verantwortlich ist. Dies könnte durch separate Beteiligte (des Maschinenbaus) erfolgen.

Bei der Planung und Entwicklung der Aktorik wurde frühzeitig die Expertise eines Stahlbauers aufgegriffen, indem konstruktive Lösungen hinsichtlich der Fertigbarkeit diskutiert wurden. Im Hinblick auf zukünftige Konstruktionen mit Realisierung alternativer technischer Prinzipien von adaptiven Systemen stelle dies laut Vertreter der Tragwerksplanung grundsätzlich eine Unterstützung dar, die jedoch noch auf eine Praxistauglichkeit überprüft werden muss: „Der Ansatz wird nicht leicht zu integrieren sein“, wenn die Vertreter der Bauausführung bereits frühzeitig und vor einem öffentlichen Vergabeprozess in die Planung einbezogen werden. „Wie entsteht weiterhin Wettbewerb?“ „Werden diese Lösungen (mit zukünftigen klimapolitischen Randbedingungen) wirklich günstiger für den Bauherrn?“ Dennoch hätte im Fall der Planung des Experimentalhochhauses die Erfahrung der ausführenden Unternehmen bei einer noch früheren Integration einen höheren Mehrwert geboten, um Kosten zu reduzieren und um Iterationen bei der Detaillierung zu vermeiden.

8.7.2.3 Vernetzung von Methoden und Prozess

Die Vernetzung von Methoden und Prozess wurde mit zwei Fragen validiert. Die Auswertung der Antworten auf Frage 17, inwiefern die dargestellte Vernetzung von Methoden und Prozess die Planung adaptiver Tragwerke unterstützt, ergab sieben Aspekte (→ alle Anf. 7):

- Die Darstellung zeigt eindeutig auf, welche Planungsschritte von welcher Disziplin durch welche Methoden unterstützt werden (→ Anf. 14).
- Die Zuordnung der Methoden zu Aktivitäten fungiert als Überblick, inwiefern der gesamte Prozess bereits methodisch unterstützt ist und das dafür „notwendige Verständnis lässt sich dank geeignetem Abstraktionsgrad gewinnen“ (→ Anf. 14).
- Die zusammenfassende Darstellung dient als Verweis auf Details in spezifischen Veröffentlichungen (→ Anf. 13).
- Die Nennung mehrerer Methoden je Aktivität deutet auf Alternativen bzw. Varianten hin (→ Anf. 14).
- Die Zuordnung der Methoden zeigt auf, wo sich (andere) Planungsbeteiligte im Prozess befinden, d. h. mit welchen Aktivitäten sich diese befassen (→ Anf. 9).

- Die Dokumentation des methodischen Vorgehens bietet Orientierung für folgende Projekte, z. B. unmittelbar als Grundlage bei der Projektierung (→ Anf. 12 und 14).
- Die Darstellung ist eine Grundlage im Lern- bzw. Lehrprozess, um „neuen Kollegen darzustellen, wie der Regelablauf ist“ (→ Anf. 12 und 14).

Zu Frage 18, inwiefern sich die Evaluationspartner vorstellen können, den Methodenbaukasten bei zukünftigen Planungsprojekten adaptiver Tragwerke anzuwenden, wurde divergent geantwortet. Während drei Partner „gerne“ den Ansatz nutzen möchten, die Anwendbarkeit „definitiv“ in einem Folgeprojekt bestätigen bzw. den „Überblick bei anderen Disziplinen ausreichend“ empfinden, erachten zwei weitere den Ansatz als „sinnvoll, wenn sich mehr Methoden etabliert haben“ (→ Anf. 12) bzw. können sich die Anwendung „vorstellen, wenn die einzelnen Handlungsschritte noch detaillierter beschrieben werden“. Ein Vertreter kann sich die Anwendung „eher gar nicht“ vorstellen und verweist wieder auf „eigene Ansätze“.

Im Allgemeinen wurde positiv angemerkt, dass eine Beschreibung der Methoden mittels Steckbriefen einen Mehrwert bietet, da hervorgeht, welches Ergebnis zu erwarten ist, aber auch, welchen Aufwand die Methode dafür erfordert (→ Anf. 14).

8.7.2.4 Requirements Engineering Ansatz

Der vorgestellte Ansatz für das Requirements Engineering wurde anhand jeweils einer Frage zum Einsatz der Webapp sowie den Hauptmerkmalen diskutiert. Frage 19, inwiefern die Webapp das interdisziplinäre Erfassen von Anforderungen und das anschließende Anforderungsmanagement im Kontext adaptiver Gebäude unterstützt, wurde mit Ausnahme eines Vertreters der Praxis als „sinnvoll“ bewertet. Dies wird begründet durch die „direkte und dokumentierte Kommunikation“, die „für jeden sichtbar“ ist, „sodass Konflikte früh ersichtlich“ (→ Anf. 10) werden und ein „guter Austausch möglich und die Nachvollziehbarkeit gegeben“ ist (→ Anf. 4). Die Webapp dient als „ein Dokument für alle, zeigt den aktuell gültigen Stand, ist online abrufbar“, und es wurde eine „einfache Bedienung“ umgesetzt. Durch das „systematische Dokumentieren“ entsteht ein „allgemeiner Überblick“ und jeder Planungsbeteiligte „hat einen Einblick, wer was braucht“ (→ Anf. 10). Insgesamt „überzeugen die Zusatzfunktionen gegenüber einem Office-Dokument“. Zwei Praxisvertreter bestätigen zwar, dass Anforderungen bisher im Projektfluss sukzessive festgehalten werden, wenn diese (final) entschieden wurden. Dies erfolge aber nicht zu Beginn des Projekts und die Anforderungen werden nicht systematisch ermittelt und verfolgt.

Auch aus Sicht der Bauherrenvertretung wird der Ansatz begrüßt („toll, das hilft“), die „App liefert eine Einsicht, wie der aktuelle Planungsstand ist“ (→ Anf. 4 bzw. 10). Aus Sicht der befürwortenden Praxisvertreter ist jedoch der Vorteil nur unter der Bedingung gegeben, dass „alle Beteiligten gleichzeitig auf das System zugreifen können und nutzen“. Der Praxisvertreter mit Vorbehalten gegenüber dem Vorschlag begründet diese mit dem „Zusatzaufwand und der Formalisierung“. Diese Bewertung könnte auf die Disziplin Architektur zurückzuführen sein, da diese die meisten Informationen bereitstellen müsste. Ein Verweis auf das Interesse der anderen Beteiligten wurde als „interessant“ kommentiert. Es sei „kein Zwischendokument gewünscht“, die Ansätze seien „wie BIM als Ganzes wertvoll“ (→ Anf. 10 und 11). Darauf wiesen auch Beteiligte der Tragwerksplanung hin, die ebenfalls keine „Doppelung zum Schriftverkehr“ wünschen, aber durch einen weiteren Ausbau des Tools eine Art Assistenzsystem als Ersatz für das Projektmanagement erkennen. Die Plattform erfordert dann eine Ausweitung für den ganzen Entwurfsprozess, was bedeutet, dass alle Ergebnisse bis zur Übermittlung der Prüfstatik „in einer App verankert“ sind und somit der Requirements Engineering Ansatz nur eine Grundlage bildet. Aufgrund der genannten Vorteile und Funktionen ist die Anwendung der entwickelten Webapp „vorstellbar“. Das „systematische Dokumentieren werde „offiziell“ bereits umgesetzt, ist „praktisch aber unzureichend“ (→ Anf. 4).

Die Funktion der Dokumentation von Änderungen an Anforderungen zur Nachverfolgung wurde als wichtig bestätigt und könnte noch um ein Kommentarfeld zur Begründung erweitert werden (→ Anf. 10). Kritisch bewertet wurde von einem Evaluationspartner, dass die Anforderungen nur auf einem Abstraktionsniveau festgehalten werden können. Bei einer zu hohen Zahl an Anforderungen könne dies unübersichtlich werden und eine fachspezifische Untergliederung erfordern. Es sei angemerkt, dass sich für diesen Zweck beliebig viele Anforderungslisten parallel zueinander erstellen lassen.

Die Evaluation der Hauptmerkmale erfolgte aufbauend auf der Fragestellung (20), inwiefern die Hauptmerkmale eines adaptiven Tragwerks eine Unterstützung darstellen, um sukzessiv während der Planung eine umfassende Anforderungsdefinition zu erstellen. Der Praxisvertreter, der die Webapp kritisch bewertete, bezeichnet die transferierten Hauptmerkmale dagegen als „sehr hilfreich“. Die „kompakt“ dargestellte Liste „deckt alle relevanten Punkte ab“, beinhaltet „die wichtigsten Aspekte, die zu Anforderungen führen“, bietet eine „Grundlage für Zuordnung von Aufgaben“ und unterstützt die Fragestellung „Wann muss ich welchen Punkt bedenken?“. Ein „Einsatz käme sehr früh in Frage“. Ein Evaluationspartner erkennt bei Anwendung der Liste eine „höhere Effizienz bei der

Anforderungsformulierung“ (→ Anf. 4). Weitere bestätigen eine Unterstützung für einen „Überblick zur Vollständigkeit und zur Parametrisierung“, wobei sich ein Partner aktuell keine Beurteilung bzgl. der Vollständigkeit zutraut. Ein weiterer merkt an, dass nicht davon ausgegangen werden darf, dass nach der Abarbeitung der Liste eine Vollständigkeit garantiert ist. Dennoch geben aus seiner Sicht die Hauptmerkmale einen „guten Überblick über die zu beachtenden Faktoren“ und die Liste „erscheint vollständig“ (→ Anf. 4). Für den Bauherrenvertreter stellen die Hauptmerkmale eine „Sammlung einer Frageliste“ dar, die als Grundlage für weitere Planungen dient. Die Übersicht zeige die Vielfalt benötigter Informationen und zu treffender Entscheidungen sowie die „Fluktuation an Aufgaben“ während des Projekts. Gerade für spezielle Aufgabenstellungen wie das adaptive Tragwerk ist die Liste eine „hilfreiche Aufstellung, was zu bedenken ist“ und „entspricht einer Wissensmanagementunterstützung“. Zu erweitern sei die Liste aber hinsichtlich von Aspekten der Betriebsphase und - abgesehen vom gewählten technischen Fokus - um weitere Kostengruppen, Verantwortlichkeiten sowie Vertragsmodalitäten. Als allgemeiner Kommentar zum vorgestellten Requirements Engineering Ansatz könnte sich laut Evaluationspartner aus dem Vorschlag einer App ein „Selbstläufer“ entwickeln, wenn das System intuitiv anwendbar ist und eine Doppelung im Schriftverkehr vermieden wird; „aus der App müssen Ergebnisse entstehen“.

8.7.2.5 Bewertungsansatz

Die Evaluation des multidisziplinären Bewertungsansatzes wird mittels zweier Fragen durchgeführt. Frage 21, inwiefern die Bewertung von Tragwerkskonzepten nach der Konzeptphase mit Hilfe des vorgestellten Bewertungsansatzes zweckmäßig realisierbar ist, und Frage 22, inwiefern der Bewertungsansatz eine Unterstützung für die Auswahl adaptiver Tragwerkskonzepte bei zukünftigen Planungsprojekten darstellt, wurden von den Evaluationspartnern überwiegend ähnlich beantwortet. Deshalb werden auch die Antworten nachfolgend zusammengefasst vorgestellt.

Die Evaluationspartner bestätigten, dass der Ansatz die Auswahl von Konzepten nach objektiven Kriterien systematisiert. Die Bewertung bedeutet eine Unterstützung, da solche Konzeptentscheidungen für eine einzelne Disziplin „wahrscheinlich zu komplex“ wären. Die Voraussetzung für die Bewertung ist, dass „unterschiedliche Konzepte gleich intensiv betrachtet werden“ (→ Anf. 5). Das bedeutet, dass die Bewertung ggf. eine unvollständige oder unpräzise Datenlage erkennen lässt (→ Anf. 10). Die Datenlage kann jedoch auch gezielt durch die „Dokumentation im Fluss des Projekts“ stetig aufgebaut

werden. Die Bewertung erfordert ggf. eine Kompromissfindung, die durch die Gegenüberstellung von Vorteilen verschiedener Varianten jedoch auch gewinnbringend ist. Nachteile in den Konzepten werden dadurch aufgedeckt und neue Lösungen angeregt. Die Anwendung unterstützt somit ein gewünschtes iteratives Vorgehen (→ Anf. 5).

Aus Sicht der Bauherrenvertretung sind Bewertungen immer relevant, wenn auch Kosten einbezogen sind. Dadurch erfolge eine Analyse von Preis und Leistung. Die Darstellung sei eine geeignete Grundlage für Entscheidungsträger, für die eine „entscheidungsfähige Visualisierung notwendig“ ist. Von einem weiteren Evaluationspartner wurde bestätigt, dass „alles Relevante auf einen Blick vorhanden“ ist und Ergebnis und Nutzen eindeutig erkennbar sind. Auch aus Sicht der Architektur unterstützt die Darstellung der Bewertung „eine gedankliche Gliederung der thematischen Aspekte“.

Laut Tragwerksplaner stellt der interdisziplinäre Bewertungsansatz trotz des Mehraufwands „ein Muss“ dar. Gemäß HOAI ist die Gegenüberstellung von Varianten auch heute bereits eine geschuldete Leistung. Der Ansatz sei absolut „richtig“, eine Variantenunterscheidung vorzunehmen. Dieser sollte während der Konzeptphase angewandt werden und könnte auch zweistufig ausfallen. Zunächst wird in einem ersten Schritt die Topologie und die Materialität bewertet und anschließend daraufhin erarbeitete Entwürfe von Bauteilkonzepten. Hier besteht dann allerdings auch ein Einfluss hinsichtlich des architektonischen Konzepts bzw. ästhetischen Fragestellungen.

Ein Evaluationspartner merkte an, dass neben den objektiven Kriterien auch subjektive in der Bewertung Berücksichtigung finden müssen. Außerdem wurde hinterfragt, wie viele Konzepte innerhalb eines Projekts vom Aufwand handhabbar bleiben. Als Größenordnung wurden 3 bis 4 Konzepte genannt, die ggf. aus einer „Vorauswahl mit K.-o.-Kriterien“ resultieren können. Aus Sicht der Systemdynamik muss beispielsweise die Steuer- und Regelbarkeit erfüllt sein [vgl. WAGNER18, S. 591 f.].

Die externen Evaluationspartner erkannten unterschiedliche Schwerpunkte in der Bewertung. Während einerseits Varianten des adaptiven Tragwerks für ein spezielles architektonisches Konzept hinsichtlich tragwerkspezifischer Kriterien bewertet werden können, lassen sich andererseits auch Tragwerkskonzepte bewerten, die (wesentlich) das architektonische Konzept beeinflussen. Entsprechend sieht ein Vertreter der Architektur für das erstgenannte Szenario die Zuständigkeit im Bereich der Tragwerksplanung („Tragwerksplaner wird Entscheider, Architekt unterstützt aber bei Fragen zur Kompatibilität mit dem architektonischen Entwurf“), während die beteiligten Tragwerksplaner beim

Entwurf eines optimalen Tragwerks vom zweiten Szenario ausgehen und mehr architektonische Kriterien (wie Ästhetik) vermissen bzw. erwarten.

Bisher entstehen in der Regel nicht mehrere architektonische Vorentwürfe, weshalb von diversen Konzepten des gleichen Tragwerks aber beispielsweise mit unterschiedlicher Anzahl an Aktoren auszugehen ist. In diesem Fall sollte „der Tragwerksplaner mit der Systemdynamik und dem Maschinenbau eine Lösung finden und der Architekt integriert die Entscheidung“ im Entwurf. Auch an dieser Stelle ist auf die längerfristig zu beantwortende Fragestellung hinsichtlich des veränderten Entwurfsvorgehens der Architektur bei adaptiven Systemen zu verweisen.

8.7.2.6 Übergreifendes Fazit der Evaluationspartner

Nach der Vorstellung aller erarbeiteten Inhalte wurden mit zwei übergreifenden Fragen der gewonnene Gesamteindruck der methodischen Unterstützung adressiert. Frage 23 lautet, wie nützlich die Evaluationspartner die vorgestellte methodische Unterstützung im Gesamtkontext halten und welche Vor- und Nachteile erkannt werden. Zusammengefasst bezeichnen die Evaluationspartner die Unterstützung als „sehr nützlich“ und „sehr wichtig für ein zielorientiertes Vorgehen“, da die Prozesse „vorab abgeschätzt werden“. Nach einer ersten „chaotischen“ Planung (des ersten adaptiven Tragwerks im Experimentalhochhaus) stellen die Ergebnisse einen „Anfang einer Ordnung von unvorhersehbaren Entwicklungen“ dar, die bedarfsgerecht im Laufe der Zeit zu vervollständigen bzw. weiterzuentwickeln sind. Der Vorteil bzw. Mehrwert biete eine „gute Grundlage für die Planung, zum Aufzeigen des aktuellen Stands und weitere anstehende Aktivitäten“ (→ Anf. 1). Die übergeordneten Schnittstellen (des Prozesses) fördern das „Verständnis aller Disziplinen über deren Zusammenarbeit“ und bieten eine gemeinsame „Planungsgrundlage“ (→ Anf. 8 und 9).

Während einzelnen Evaluationspartnern die Unterstützung bereits als „schlüssig“ erscheint, bewertet ein Partner die Unterstützung als „zurzeit eventuell noch rudimentär, da fehlende Erfahrung“ durch nicht vorhandene weitere Planungsprojekte dieser Art (für die Beurteilung / die weitere allgemeingültige Ausarbeitung) erforderlich ist. Allgemein weist ein Praxisvertreter daraufhin, dass aus der Bereitschaft der Anwendung eine stetige Anpassung an Gegebenheiten hervorgeht. Ein Forschungsvertreter regt an, dass der Abstraktionsgrad im Prozess evtl. individuell angepasst werden muss. Eine weitere Meinung wiederholt, dass die „umfangreiche“ Methodenunterstützung auch stärker aus Sicht der einzelnen Disziplin (z. B. Architektur) zu erarbeiten ist und durch eine Aufspaltung

„evtl. übersichtlicher“ wird. Der Vertreter der Architektur attestierte der vorgeschlagenen Unterstützung einen „hohen Formalismus bei der Anwendung“. Diese Rückmeldung ähnelt den Erkenntnissen aus dem Methodentransfer von Lindemann et al., in dessen Rahmen ein Industriepartner aus der Baubranche in den Methodenanwendungen sogar einen „übertriebenen Formalismus“ erkannte [LINDEMANN05, S. 28].

Die zweite Frage (24), ob die Evaluationspartner die vorgestellte Unterstützung bei der zukünftigen Planung eines adaptiven Tragwerks anwenden würden, wurde von allen Beteiligten knapp, aber einstimmig bejahend beantwortet. Während ein Praxisvertreter insbesondere den Mehrwert bei dem Prozess sieht, weist ein anderer auf potenzielle Anlaufschwierigkeiten (bei „neuen“ Vorgehensweisen) hin.

Darüber hinaus wurde das Fazit mit weiteren Anmerkungen ergänzt. So seien laut Bauherrenvertretung die „Ergebnisse hilfreich, wenn die Entscheidung bzgl. einer Adaptivität ansteht“. „Die Ergebnisse ermöglichen einen Blick über das Ganze und nicht nur über ein spezifisches Problem“, was häufig während der Planung diskutiert wurde. Es ist nun erkennbar, „was im Projekt noch kommt“ und relevante Fragestellungen lassen sich „zum richtigen Zeitpunkt erkennen“, was die Priorisierung unterstützt (→ Anf. 1).

Aus Sicht des Architekten wären „die Ergebnisse im Voraus eine große Hilfe gewesen, um Zeit zu sparen und die Koordination zu unterstützen“. Mit den Ergebnissen sei die Frage beantwortet, „wer wann in den Planungsprozess einsteigt“ und „wann welche Ergebnisse vorliegen“ (→ Anf. 9 und 10).

8.7.2.7 Ausblick aus Sicht der Evaluationspartner

Als Abschluss und mit Bezug auf zukünftige Forschungsaktivitäten wurden die Evaluationspartner um die Beantwortung der Frage 25 gebeten, welcher weitere Unterstützungsbedarf in diesem Kontext erkannt wird. Die individuellen Antworten betreffen unterschiedliche Zielsetzungen. So lassen sich aus Sicht eines Forschungsvertreters die Zusammenarbeit durch interdisziplinäre Teams stärker ausbauen, indem das regelmäßig zustande gekommene Zusammenkommen der einzelnen Disziplinen durch eine „verankerte Teamarbeit“ intensiviert wird. Dies wäre ein Anstoß zu mehr Kreativität und dem „Fusionieren von Methoden und Ergebnissen“ des bisherigen Vorgehens. Ein anderer Evaluationspartner wünscht eine „präzisere Aufarbeitung der Schnittstellen bezüglich benötigter Zuarbeit und Abhängigkeiten“, wobei die Allgemeingültigkeit trotz projektspezifischer Randbedingungen berücksichtigt bleiben muss.

Aus Sicht der Architektur ist die Ausarbeitung des Beispielkatalogs für adaptive (Hüllen und) Strukturen „wichtig“ und könnte sich analog zum Stahlbauatlas [BOLLINGER11] bzw. Holzbauatlas [KAUFMANN21] etablieren. Ein ähnlicher Ansatz wurde vom Evaluationspartner des Maschinenbaus genannt, der einen Mehrwert in der Erarbeitung von DfX-Kriterien sieht. Diese sind wiederum in der Produktentwicklung etabliert [PAHL13, S. 583] und könnten für den Kontext adaptiver Systeme Prinziplösungen zugunsten der technischen Integration, Fertigung und Montage, Wartung sowie dem Recycling bieten. Außerdem sind Rückkopplungen der späteren Phasen in frühe Phasen von Folgeprojekten im Detail zu erarbeiten.

Daneben wird auch für die Bauherren eine Unterstützung angeregt, sodass diese „richtige“ und „selbsterklärende“ Rückschlüsse aus den Ergebnissen der Methoden ziehen können. Außerdem wurde vorgeschlagen, „Systemlösungen“ der Adaptivität zu entwickeln und den Prozess bzgl. der Planung und Entwicklung adaptiver Hüllen bzw. Fassaden zu erweitern. Auf die letzteren beiden Anregungen wird im Ausblick in Kapitel 10 eingegangen. Zuletzt besteht der Wunsch von Seiten der Evaluationspartner, dass der Prozess mit dem Wissenszuwachs im Forschungsfeld adaptiver Systeme „regelmäßig Updates“ erfährt.

8.7.3 Zusammenfassung der Evaluationsergebnisse

Die Evaluationspartner bewerteten die entwickelte methodische Unterstützung im Grundsatz sehr positiv und wiesen auf Anknüpfungspunkte des konventionellen Bauens als auch auf individuell identifizierte Hürden hin. In Bezug auf den in Kapitel 4.4 vorgestellten Zweck der Unterstützungsevaluation [BLESSING09, S. 176 f.] zur Sicherstellung der Konsistenz, Vollständigkeit und Logik konnten keine Erfordernisse zur Korrektur der vorgestellten Ergebnisse identifiziert werden. Grundsätzlich wurden die Anwendbarkeit und das Unterstützungspotenzial als Mehr- bzw. Neuheitswert bestätigt. Der Mehrwert resultiert darin, dass für die zukünftige Planung adaptiver Tragwerke eine Empfehlung zur Vorgehensweise vorliegt und somit die gewonnenen Erkenntnisse bei der Planung des Experimentalhochhauses unmittelbar berücksichtigt werden können. Dadurch ist laut Evaluationspartnern ein Vorteil gegeben, der zukünftig Zeit, Kosten und Koordinationsaufwand bei der Planung reduziert. Der Prozess stellt eine Empfehlung dar, welche Disziplinen zukünftig mit welchen Aktivitäten bzw. Teilschritten, Schnittstellen und (derzeit existierenden) Methoden bzw. Werkzeugen ein adaptives Tragwerk planen können. Auch

die Integration des Requirements Engineerings, des Ansatzes zur Reduktion der Umweltwirkungen und des Tragwerksbewertungsansatzes wurden als notwendig erachtet.

Die bei der Zusammenfassung der Antworten eingebundenen Verweise auf die Anforderungen (vgl. Kapitel 6.3) stellt Tabelle 8.3 in einer Übersicht dar. Da Verweise nur im Fall erfüllter Anforderungen angegeben sind, ist feststellbar, dass alle Anforderungen adressiert wurden. Aus der Evaluation geht außerdem hervor, dass die in Kapitel 4.2 aufgestellte Forschungshypothese durch die Evaluationspartner bestätigt wird.

Anforderung (vgl. Kapitel 6.3)	1	2	3	4	5	6	7
Bezug zu Antworten auf Evaluationsfrage Nr.	14; 16, 23, 24	14	14, 16	14, 19, 20	15, 21/ 22	16	15, 17
Anforderung (vgl. Kapitel 6.3)	8	9	10	11	12	13	14
Bezug zu Antworten auf Evaluationsfrage Nr.	13, 14, 23	12, 13, 15, 16, 17, 23, 24	12, 16, 19, 21/ 22, 24	19	15, 17, 18	10, 17	17, 18

Tabelle 8.3: Bezüge zwischen Anforderungen und Antworten auf Evaluationsfragen

Anzumerken ist, dass das Anstreben gemeinsam genutzter Modelle (Anforderung 11) durch den Prozess zwar ermöglicht wird, aber nicht zwangsläufig sichergestellt ist. Die Umsetzung der Anforderung ist daher durch das Planungsteam zu Beginn der Planung bzw. bei der Auswahl der Planungsteilnehmer zu adressieren. Außerdem stellt Anforderung 6 die Schnittstelle zur langfristigen Erweiterung des Planungsprozesses dar, die sich erst mit den dafür notwendigen zukünftigen Erkenntnissen beurteilen lässt. Zu den Ergebnissen zählen einerseits weitere Anforderungen bzw. Prozessbestandteile aus späteren Lebenszyklusphasen wie Inbetriebnahme, Nutzung und Betrieb, Wartung und Instandhaltung sowie Rückbau. Andererseits sind auch bereits in frühen Phasen detaillierte Anforderungen von Bauherren wie beispielsweise Kosten aufzugreifen.

9 Zusammenfassung

Die Planung adaptiver Tragwerkssysteme und die Entwicklung darin enthaltener Komponenten erfordert eine bisher ungekannte Zusammenarbeit der Disziplinen Architektur, Tragwerksplanung, Systemdynamik und Maschinenbau, die bestehende Aktivitäten des konventionellen Planungsprozesses von Gebäuden maßgeblich erweitert. Auf den Erkenntnissen der Planung des Experimentalhochhauses des Sonderforschungsbereichs 1244 beruhend entsteht im Rahmen der Arbeit eine methodische Unterstützung von Aktivitäten der Planung und Entwicklung. Durch die Verschmelzung von Prozessen der Gebäudeplanung und der Produktentwicklung wird beantwortet, in welcher Abfolge und mit welchen Schnittstellen Planungsschritte adaptiver Tragwerkssysteme aufeinander aufbauen. Dieser neu entwickelte Planungsprozess zeigt ein Vorgehen auf, das vor der Planung des adaptiven Gebäudes von den Planungsbeteiligten nicht vorstellbar war. Durch einen in den Prozess integrierten Methodenbaukasten wird auf derzeit erprobte Methoden und methodische Werkzeuge verwiesen, die sich für jeweilige Planungsschritte eignen. Zudem werden durch den Transfer von Methoden der Produktentwicklung Prozessschritte unterstützt, die eine besondere Relevanz im Planungsfortschritt darstellen.

Als Basis dieser Ergebnisse dienen zunächst eine Zusammenfassung bestehender Prozesse der Gebäudeplanung und der Produktentwicklung sowie Grundlagen allgemeiner methodischer Vorgehensweisen. In diesem Zusammenhang erfolgt im Wesentlichen die Vorstellung der Methoden, die im Rahmen der Arbeit für den Anwendungskontext transferiert und für eine Anwendung im Prozess vorgeschlagen werden. Außerdem wird auf den im Kontext stehenden Forschungsstand adaptiver Tragwerke eingegangen.

Zur Nachvollziehbarkeit der Abgrenzung der entwickelten methodischen Unterstützung werden zunächst das Vorgehen bei der Planung des adaptiven Tragwerks vom Experimentalhochhaus und der Entwicklung der darin integrierten Aktorik erläutert. Das Augenmerk liegt auf den Aktivitäten der beteiligten Disziplinen, deren Schnittstellen, Teilergebnissen sowie stattgefundenen Iterationen. Daneben folgt die Darlegung von Herausforderungen, die aus Sicht der Planungsbeteiligten zu bewältigen waren und einen Unterstützungsbedarf bei zukünftigen Planungsprojekten dieser Art benötigen. Darunter fallen insbesondere das anfangs fehlende technische Konzept und die Auswirkungen auf das disziplinenübergreifende Vorgehen. Die Erkenntnisse aus der Planung bilden die Grundlage für die Anforderungsdefinition an die zu entwickelnde methodische Unterstützung.

Um Methoden für zukünftige Planungsprozesse adaptiver Tragwerkssysteme zweckmäßig bereitstellen und vorschlagen zu können, wird mittels Auswahl eines geeigneten Darstellungs- und Auswahlkonzepts ein Methodenbaukasten erarbeitet, der die Kopplung zwischen Methoden und dem Prozess ermöglicht. Der Vorteil des Prozesses mit integriertem Methodenbaukasten beruht in der transparenten Darstellung der vorhandenen methodischen Unterstützung von Prozessphasen bzw. Aktivitäten. Der interdisziplinäre Methodenbaukasten ist initial mit Methoden befüllt, die sich bei der Planung des Experimentalhochhauses bewährt bzw. anderweitig etabliert haben oder im Kontext der Arbeit transferiert wurden.

Aus der Ermittlung des Unterstützungsbedarfs ging der Bedarf eines kontextspezifischen Requirements Engineering Ansatzes hervor, der neben einer für die interdisziplinäre Zusammenarbeit entwickelten Webapp auch Hauptmerkmale zur Unterstützung einer vollständigen Anforderungsdefinition beinhaltet. Weitere zentrale Bestandteile sind die Integration einer Methodik zur systematischen Reduktion von Umweltwirkungen bei der Planung adaptiver Tragwerke sowie eines Vorgehens zur Entwicklung des Sicherheitskonzepts. Um verschiedene Lösungskonzepte von Tragwerkskonzepten - beispielsweise mit unterschiedlicher Anzahl an aktiven Elementen - vergleichen zu können, wird ein multidisziplinärer Tragwerksbewertungsansatz vorgestellt, der grundlegende Bewertungs- bzw. Auswahlkriterien zur Ermittlung eines Vorzugskonzepts aufzeigt.

Ausgehend von der Prozessdarstellung wurde zu dessen Veranschaulichung der entwickelte Prozess in ein abstrahiertes Vorgehensmodell in Form eines W-Modells transferiert. Als Erweiterung zu sonstigen Bestandteilen der konventionellen Gebäudeplanung sind beide Darstellungen durch den (formalisierenden) Blickwinkel der Produktentwicklung geprägt und fokussieren inhaltlich auf die den Neuheitswert darstellende Entwicklung des adaptiven Tragwerkssystems.

Die Ergebnisse der Arbeit wurden in Form eines geleiteten Interviews von neun an der Planung des Experimentalhochhaus Beteiligten evaluiert. Diese bestätigten die Anwendbarkeit und den Mehrwert der Unterstützung bei zukünftigen Planungsprojekten adaptiver Tragwerkssysteme. Laut Aussage der Evaluationspartner wären der Prozess und die Methoden vor der Planung des Experimentalhochhauses eine große Hilfe gewesen, um Zeit zu sparen und die Koordination zu unterstützen. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse erneut, dass die Anwendung von Methoden und methodischen Werkzeugen, die aus der Produktentwicklung bekannt sind, in der Bauplanung Vorteile bietet.

10 Ausblick

Die vorliegende Arbeit ist Bestandteil eines jungen Forschungsfelds, in dem die vorgestellten technischen Lösungen und die zur Planung und Entwicklung notwendigen Vorgehensweisen als Grundlagenforschung anzusehen sind. Entwicklungen dieser Art bewegen sich „naturgemäß (...) zunächst in Richtung einer Komplexitätssteigerung, bevor sie danach in eine Phase der Vereinfachung, einer Steigerung der Robustheit und eines Sinkens der Kosten einmünden“ [SOBEK14B, S. 516]. Zunächst sind die vorgestellten technischen Lösungsprinzipien bzgl. der Wirksamkeit zur Reduktion von Umweltwirkungen zu bestätigen. Zur Etablierung adaptiver Systeme sind Standards notwendig, die neben diesem eigentlichen Nutzen Aspekte einer breiteren Lösungsvielfalt, der Sicherheit bzw. Robustheit über den Lebenszyklus und rechtlicher Verbindlichkeiten umfassen.

Die vorgestellte methodische Unterstützung ist bei der nächsten Planung eines adaptiven Tragwerks zu evaluieren. Während deren Anwendung ist zu bewerten, ob die an das Vorgehen gestellten Anforderungen auch unter neuen Randbedingungen erfüllt bleiben und inwiefern weitere Herausforderungen aufkommen, die Potenziale für eine Weiterentwicklung der vorgestellten Ergebnisse bieten.

Für die inhaltliche Erweiterung des vorgestellten Vorgehens sind zunächst die Interaktionen zwischen dem Nutzer und dem adaptiven System sowie dessen Wahrnehmungen während des Aufenthalts im Gebäude zu untersuchen und daraufhin Nutzeranforderungen abzuleiten. Nachdem das zentral in der Arbeit verankerte Forschungsgebäude primär mit dem Fokus der technischen Realisierbarkeit geplant und der vorgestellte Prozess entsprechend fokussiert ausgerichtet ist, dienen diese Erkenntnisse der Architektur zur Beantwortung, wie Gebäude mit Ausschöpfung von Potenzialen der Adaptivität entworfen werden können und wie die Kreativität als Expertise der Architektur Prozessbestandteil wird. Daneben stellt die Digitalisierung ein Hilfsmittel dar, um der Komplexität und Vielseitigkeit der zu berücksichtigenden Aspekte wie der Wirtschaftlichkeit gerecht zu werden. Zum Beispiel können im Planungsprozess durch den Datenaustausch zwischen den vorgestellten (Bewertungs-) Methoden und eine tiefgreifende Integration von digitalen Werkzeugen wie BIM Synergien genutzt und Aufwände verringert werden. Die Weiterentwicklung digitaler Werkzeuge des Systems Engineering und deren Anwendung erfordern und stärken zugleich die interdisziplinäre Arbeit. Diese Ansätze erhalten jedoch in der Praxis der konventionellen Planung erst jetzt Einzug.

Die Evaluationsergebnisse zur Anwendbarkeit der Produktentwicklungsmethoden sprechen dafür, weitere Optimierungs- bzw. Unterstützungspotenziale innerhalb des Prozesses aufzudecken und noch mehr Methoden zu transferieren. Ansatzpunkte können insbesondere die intensivere Betrachtung späterer Lebenszyklusphasen des Experimentalhochhauses und die Integration der Aktivitäten von Bauherren in den Prozess liefern. Gleichmaßen wie adaptive Tragwerkssysteme im Rahmen der Arbeit behandelt wurden, erfordern auch Systeme adaptiver Hüllen und Fassaden eine methodische Unterstützung bei der Planung und Entwicklung. Erste konzipierte Ansätze ließen Synergien und Analogien zur vorgestellten Unterstützung für adaptive Tragwerkssysteme erkennen. Der vorgestellte Methodenbaukasten ist dafür vorgesehen, mit weiteren, im Kontext adaptiver Systeme für Tragwerk und Gebäudehülle entwickelten bzw. erprobten Methoden ergänzt zu werden.

Als Erfolgsfaktor für die weitere Durchsetzung dieser Systeme kann auch die Entwicklung von Systemlösungen beitragen. Das zugrundeliegende Prinzip und individuelle Vorteile werden von Bild 10.1 durch eine Gegenüberstellung der individuellen Entwicklung und dem sogenannten Baureihenansatz veranschaulicht.



Individualentwicklung

Projektspezifische Entwicklung und Integration der Aktorik

- Realisierbarkeit individueller Anforderungen gegeben
- ausgeprägte Designfreiheit
- theoretisch höherer Wirkungsgrad des Systems möglich

Baureihenansatz

Integration vorentwickelter adaptiver Systeme als „Katalogware“

- geringerer Entwicklungsaufwand
- höhere Produktreife durch Standardisierung und Erprobung
- günstigere Bauteilherstellung infolge von Stückzahleffekten
- frühzeitige Kostentransparenz und kalkulierbare Lieferzeiten
- standardisierte Wartungsmaßnahmen und verfügbare Ersatzteile

Bild 10.1: Gegenüberstellung der Individualentwicklung und des Baureihenansatzes

Während die individuelle Entwicklung dem in der Arbeit vorgestellten Vorgehen entspricht, würde insbesondere das Aufgabenfeld des Maschinenbaus im Planungsprozess zu einer projektunabhängigen Entwicklung der Aktorik verschoben werden. Tragwerksplanung und Systemdynamik erhielten innerhalb eines Planungsprojekts die Option der Integration bereits vorentwickelter Systemelemente. Planung und Entwurf des Gebäudes blieben weiterhin individuell, vergleichbar mit Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung ließen sich jedoch die adaptiven Systeme „aus einem Katalog“ einsetzen. Zu

untersuchen ist, inwiefern sich Ausschnitte des vorgestellten Prozesses für die Entwicklung adaptiver Tragwerksmodule anwenden lassen und inwiefern der Prozess für die Planung bzw. den Entwurf mit vorentwickelten Systemen abzuwandeln ist.

Die externen Evaluationspartner erkennen in einer zukünftigen Baukastenentwicklung positive Stückzahleffekte wie minimierte Planungs- bzw. Entwicklungsaufwände. Der Rückgriff auf bestehende funktionierende Lösungen sei generell vorteilhaft. Aufgrund der in der Planungspraxis vorhandenen Unschärfe bei individuellen Lösungen werden Systemlösungen wirtschaftlicher und auch nachhaltiger erarbeitet, da sich die Bemessungsgrenzen risikoärmer ausreizen lassen. Folglich stellt der Ansatz ein Potenzial dar, um die eingangs erwähnte Kosten- und Risikominimierung für das Etablieren adaptiver Systeme zu erzielen und um eine Lösung für Brückensysteme aufzuzeigen.

Literaturverzeichnis

- AIA07 American Institute of Architects (Hrsg.): *Integrated Project Delivery: A Guide*, 2007. Verfügbar unter: http://info.aia.org/siteobjects/files/ipd_guide_2007.pdf, zuletzt geprüft am 24.10.2021.
- AKBW09 Architektenkammer Baden-Württemberg, Architektenkammer Rheinland-Pfalz (Hrsg.): *Bauteam - ein Leitfaden für Architekten und Handwerker*, 2009. Verfügbar unter: https://www.akbw.de/fileadmin/download/dokumenten_datenbank/AKBW_Broschueren/Bauherreninformationen/Bauteam-Leitfaden_ergaenzt.pdf, zuletzt geprüft am 24.10.2021.
- ALBERS14 Albers, A.; Walter, B.; Gladysz, B.; Reiß, N.; Dörr, M.; Hinkelmann, M.: Ansatz zur situations- und bedarfsgerichteten Methodenauswahl in der Produktentwicklung basierend auf dem Systemtripel aus Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem. In: Rieg, F.; Brökel, K.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Stelzer, R. (Hrsg.): *Ta-gungsband 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik*. Bayreuth, 2014, S. 83-94. - ISBN 978-3-00-046544-4
- ALBERS15 Albers, A.; Reiss, N.; Bursac, N.; Walter, B.; Gladysz, B.: InnoFox - Situationsspezifische Methodenempfehlung im Produktentstehungsprozess. In: Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Roth, D. (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015*. Stuttgart, 2015. - ISSN 2364-4885
- ANDERL12 Anderl, R.; Nattermann, R.; Rollmann, T.: Das W-Modell - Systems Engineering in der Entwicklung aktiver Systeme. In: Sendler, U. (Hrsg.): *PLMportal: Positionen aus Wissenschaft und Forschung*. München, 2012. - ISSN 2193-8415
- BAUMGART16 Baumgart, I.: Requirements Engineering. In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser, 2016, S. 425-453. - ISBN 9783446445185
- BECH14 Bech, J.: *Die Funktion des öffentlichen Bauherrn im Projektmanagement: Bauherrenaufgaben und Organisationsschäden, dargestellt anhand von Fallstudien*. Berlin: DVP-Verlag, 2014. - ISBN 978-3937130514
- BENDER05 Bender, K.: *Embedded Systems – qualitätsorientierte Entwicklung*. Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- BENDER16 Bender, B.; Gericke, K.: Entwicklungsprozesse. In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser, 2016, S. 401-424. - ISBN 978-3-446-44518-5

- BENEKE04 Beneke, F.: Produktentwicklung. Arbeiten in und mit verschiedenen Disziplinen – wozu? In: Brand, F.; Schaller, F.; Völker, H. (Hrsg.): *Transdisziplinarität. Bestandsaufnahme und Perspektiven*. Göttingen: Universitätsverlag, 2004.
- BERGMANN13 Bergmann, C.: *Prozessneugestaltung im Bauen – eine Strategie*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Dissertation, 2013.
- BERTSCHE04 Bertsche, B.; Lechner, G.: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau - Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2004. - ISBN 978-3-540-20871-6
- BERTSCHE16 Bertsche, B.; Stohrer, M.: Zuverlässigkeit und Sicherheit. In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser, 2016, S. 185-214. - ISBN 978-3-446-44518-5
- BESCHERER16 Bescherer, V.: *Entwicklung eines webbasierten Tools zur Erstellung von Anforderungslisten für den Einsatz in kleinen Entwicklungsteams*. Stuttgart, Universität, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Studienarbeit, 2016.
- BLEICHER12 Bleicher, A.: Aktive Schwingungskontrolle einer Spannbandbrücke mit pneumatischen Aktuatoren. In: *Bautechnik* 89 (2012), Heft 2, S. 89-101. - <https://doi.org/10.1002/bate.201201539>
- BLESSING 94 Blessing, L.: *A Process-Based Approach to Computer-Supported Engineering Design*. Enschede: University of Twente, Enschede and the Netherlands, Dissertation, 1994. - ISBN 0-9523504-08
- BLESSING09 Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer, 2009. - ISBN 9781848825864
- BOLLINGER11 Bollinger, K.; Grohmann, M.; Feldmann, M.; Giebeler, G.; Pfanner, D.; Zeumer, M.: *Atlas Moderner Stahlbau: Stahlbau im 21. Jahrhundert*. München: Detail, 2011. - ISBN-13: 9783920034522
- BORRMANN15 Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J.: *Building Information Modeling. Technische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. - ISBN 978-3-658-05605-6
- BRAND04 Brand, F.: Transdisziplinarität - Voraussetzung für naturwissenschaftlichen und mathematischen Erkenntnisgewinn? In: Brand, F.; Schaller, F.; Völker, H. (Hrsg.): *Transdisziplinarität. Bestandsaufnahme und Perspektiven*. Göttingen: Universitätsverlag, 2004.

- BRÖHL95 Bröhl, A.-P.; Dröschel, W.: *Das V-Modell: der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden*. 2. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 1995. - ISBN 3-486-23470-6
- BURGHARDT21 Burghardt, T.; Honold, C.; Bachmann, M., Roth, D.; Binz, H.; Böhm, M.; Wagner, J.; Sawodny, O.; Weidner, S.; Sobek, W.: Anforderungsermittlung für adaptive Stützen und Aussteifungselemente in Tragkonstruktionen. In: *Konstruktion*, 73 (2021), Heft 10, S. 64-70. - <https://doi.org/10.37544/0720-5953-2021-10-64>
- BURGHARDT23 Burghardt, T.; Honold, C.; Böhm, M.; Heidingsfeld, J. L.; Bachmann, M., Roth, D.; Binz, H.; Sawodny, O.; Kreimayer, M.: Entwicklung von Aktoren für ein adaptives Hochhaustragwerk. In: *Konstruktion*, 75 (2023), Heft 01-02, S. 68-74. - <https://doi.org/10.37544/0720-5953-2023-02-68>
- CABEZA14 Cabeza, L.; Rincón, L.; Vilariño, V.; Pérez, G.; Castell, A.: Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 29 (2014), S. 394-416. - <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>.
- CROSS92 Cross, N.; Roozenburg, N.: Modelling the Design Process in Engineering and in Architecture. In: *Journal of Engineering Design*, 3:4 (1992), S. 325-337. - <https://doi.org/10.1080/09544829208914765>
- CROSTACK18 Crostack, A.: *Grundlagen einer Konstruktionsmethodik für hybride intelligente Konstruktionselemente (HIKE)*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktions-technik und Technisches Design, Dissertation, 2018. - ISBN 978-3-922823-91-9
- CURBACH13 Curbach, M.: Bauen für die Zukunft. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Heft 11, S. 751.
- DAENZER02 Daenzer, W.; Huber, F.: *System Engineering. Methodik und Praxis*. Zürich: Orell Füssli, 2002. - ISBN 3-85743-998-X
- DIN 18205 1996 DIN 18205 April 1996. *Bedarfsplanung im Bauwesen*. Berlin: Beuth.
- DIN 18205 2016 DIN 18205 November 2016. *Bedarfsplanung im Bauwesen*. Berlin: Beuth.
- DIN EN 15804 2014 DIN EN 15804 Juli 2014. *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Berlin: Beuth.
- DIN EN 1990 2010 DIN EN 1990 Dezember 2010. *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung*. Berlin: Beuth.

- DIN EN 1991-1-4/NA 2010 DIN EN 1991-1-4/NA Dezember 2010. *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten*. Berlin: Beuth.
- DIN EN 1998-1/NA 2021 DIN EN 1998-1/NA Juli 2021. *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 14040 2009 DIN EN ISO 14040 November 2009. *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 14044 2021 DIN EN ISO 14044 Februar 2021. *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: Beuth.
- EBERT12 Ebert, C.: *Systematisches Requirements Engineering*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2012. - ISBN 978-3-89864-812-7
- EHRENSPIEL17 Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 6. Auflage. München, Wien: Carl Hanser, 2017. - ISBN 978-3-446-44089-0
- EIGNER14A Eigner, M.: Einleitung - Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung. In: Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. (Hrsg.): *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014, S. 1-14. - ISBN 978-3-662-43815-2
- EIGNER14B Eigner, M.: Überblick Disziplin-spezifische und -übergreifende Vorgehensmodelle. In: Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. (Hrsg.): *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014, S. 15-52. - ISBN 978-3-662-43815-2
- EISENBART11 Eisenbart, B.; Gericke, K.; Blessing, L.: A framework for comparing design modelling approaches across disciplines. In: *Proceedings of the Design Society: 18th International Conference on Engineering Design (ICED11), Impacting Society through Engineering Design: Design Processes*. Bd. 68-2. Copenhagen: Design Society, 2011, S. 344-355. - ISBN 978-1-904670-22-3
- ERDELL06 Erdell, E.: *Methodenanwendung in der Hochbauplanung - Ergebnisse einer Schwachstellenanalyse*. München, Technische Universität München, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Dissertation, 2006.

- FELDHUSEN13A Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Der Produktentwicklungsprozess (PEP). In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz - Konstruktionslehre - Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung*, 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 11-24. - ISBN 978-3-642-29568-3
- FELDHUSEN13B Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Göpfert, J.; Tretow, G.: Technische Systeme. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz - Konstruktionslehre - Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung*, 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 237-282. - ISBN 978-3-642-29568-3
- FELDHUSEN13C Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Nagarajah, A.; Pahl, G.; Beitz, W.; Wartzack, S.: Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz - Konstruktionslehre - Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung*, 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 291-410. - ISBN 978-3-642-29568-3
- FELGEN07 Felgen, L.: *Systemorientierte Qualitätssicherung für mechatronische Produkte*. München, Technische Universität München, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Dissertation, 2007.
- FERNIE03 Fernie, S.; Green, S. D.; Weller, S. J.: Requirements Management. Dilettantes, discipline and discourse: Requirements Management for construction. In: *Engineering, Construction and Architectural Management 10* (2003), Nr. 5, S. 354-367. - <http://dx.doi.org/10.1108/09699980310502964>
- FISCHER18 Fischer, S.: *Entwicklung einer Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden*. Stuttgart, Universität, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Studienarbeit, 2018.
- FLAIG15 Flaig, C.; Haase, W.; Sobek, W.: Manipulation von Spannungs- und Verformungsfeldern für statische und dynamische Beanspruchungen. In: Binz, H. (Hrsg.): *Hybride Intelligente Konstruktionselemente (HIKE) - Abschlusskolloquium der DFG-Forschergruppe 981*, Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, 2015. - ISBN 978-3-922823-92-6
- GAUSEMEIER01 Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.: *Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen*. München, Wien: Carl Hanser, 2001. ISBN 3-446-21631-6

- GERICKE11 Gericke, K.; Blessing, L.: Comparisons of design methodologies and process models across domains: a literature review. In: *Proceedings of the Design Society: 18th International Conference on Engineering Design (ICED11), Impacting Society through Engineering Design: Design Processes*. Bd. 68-1. Copenhagen: Design Society, 2011, S. 393-404. - ISBN 978-1-904670-21-6
- GERICKE12 Gericke, K.; Blessing, L.: An analysis of design process models across disciplines. In: Marjanovic, D.; Storga, M.; Pavkovic, N.; Bojcetic, N. (Hrsg.): *Proceedings of the Design Society. 12th International Design Conference, DESIGN*. Bd. 70. Zagreb, Glasgow: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia, The Design Society, 2012, S. 171-180. - ISBN 9789537738204
- GILZ14 Gilz, T.: Requirements Engineering und Requirements Management. In: Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. (Hrsg.): *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014, S. 53-76. - ISBN 978-3-662-43815-2
- GIRMSCHIED10A Girmscheid, G.: Anforderungs-Engineering-Prozessmodell (AEP) - Teil 1. In: *Bauingenieur*, Band 80 (2010), S. 197-203.
- GIRMSCHIED10B Girmscheid, G.: Anforderungs-Engineering-Prozessmodell (AEP) - Teil 2. In: *Bauingenieur*, Band 80 (2010), S. 204-209.
- GRABOWSKI97 Grabowski, H.; Geiger, K.: *Neue Wege zur Produktentwicklung*. Stuttgart: Raabe 1997. - ISBN 3886493474
- GRANER13 Graner, M.: *Der Einsatz von Methoden in Produktentwicklungsprojekten*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013. - ISBN 978-3-658-01277-9
- GÜNTHER99 Günther, J.; Ehrlenspiel, K.: Comparing designers from practice and designers with systematic design education. In: *Design Studies*, Volume 20, Issue 5 (1999), S. 439-451. - [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(99\)00019-8](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(99)00019-8)
- HAASE11A Haase, W.; Klaus, T.; Knubben, E.; Mielert, F.; Neuhäuser, S.; Schmid, F.; Sobek, W.: *Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011. - ISBN 978-3-8167-8606-1
- HAASE11B Haase, W.; Klaus, T.; Schmid, F.; Schmidt, T.; Sedlbauer, K.; Sobek, W.; Synold, M.: Adaptive textile und folienbasierte Gebäudehüllen. In: *Bautechnik 88* (2011), Heft 2, S. 69-75. - DOI: 10.1002/bate.201110005
- HAASE14 Haase, W.; Husser, M.; Sobek, W.; Kurz, E.; Rau, L.; Frühauf, N.: Flüssigkristallbasierte Verglasung zur Regelung des Licht- und Energieeintrags in Gebäude. In: Weller, B.; Tasche, S. (Hrsg.): *Glasbau*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2014. - ISBN 978-3-433-03071-4

- HANSELKA07 Hanselka, H.; Breitbach, E.; Bein, T.; Krajenski, V.: Mechatronik/Adaptronik. In: Hering, E.; Modler, K.-H.: *Grundwissen des Ingenieurs*. München: Carl Hanser Verlag, 2007. - ISBN 978-3-446-22814-6
- HEIDEMANN14 Heidemann, A.: Integrale Planung der Gebäudetechnik. In: Heidemann, A.; Kistemann, T.; Stolbrink, M.; Kasperkowiak, F.; Heikrodt, K.: *Integrale Planung der Gebäudetechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014, S. 7-99. - ISBN 978-3-662-44748-2
- HOAI13 *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure vom 10. Juli 2013 - Textausgabe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. - ISBN 978-3-658-03270-8
- HONOLD17A Honold, C.; Binz, H.; Roth, D.: Technical planning tasks and participants involved in planning adaptive buildings. In: Maier, A.; Škec, S.; Kim, H.; Kokkolaras, M.; Oehmen, J.; Fadel, G.; Salustri, F.; van der Loos, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)*, Vol. 1: Resource-Sensitive Design | Design Research Applications and Case Studies. Vancouver, 2017, S. 131-140. - ISBN 978-1-904670-89-6
- HONOLD17B Honold, C.; Binz, H.; Roth, D.: Requirements Engineering für die Planung und Entwicklung adaptiver Bauwerke. In: Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Roth, D. (Hrsg.): *4. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, 2017, S. 267-276. - ISSN 2364-4885
- HONOLD19A Honold, C.; Leistner, S.; Roth, D.; Binz, H.; Sobek, W.: Anforderungen in der Entwurfsphase des integralen Planungsprozesses adaptiver Gebäude. In: Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Riedel, O.; Spath, D.; Roth, D. (Hrsg.): *5. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 2019, S. 203-212. - ISSN 2364-4885
- HONOLD19B Honold, C.; Fischer, S.; Roth, D.; Binz, H.: Methodenlandkarte zur Auswahl von Produktentwicklungsmethoden im interdisziplinären Kontext. In: Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Riedel, O.; Spath, D.; Roth, D. (Hrsg.): *5. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 2019, S. 143-152. - ISSN 2364-4885
- HONOLD19C Honold, C.; Leistner, S.; Roth, D.; Binz, H.; Sobek, W.: Method toolbox for the multidisciplinary planning and development of adaptive buildings. In: Wartzack, S.; Schleich, B.; Guerreiro Gonçalves, M.; Eisenbart, B.; Völkl, H. (Hrsg.): *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*. Delft, 2019, S. 169-178. - DOI:10.1017/dsi.2019.20

- HOUSNER97 Housner, G. W.; Bergman, L. A.; Caughey, T. K.; Chasiakos, A. G.; Claus, R. O.; Masri, S. F.; Skelton, R. E.; Skelton, R. E.; Soong, T. T.; Spencer, B. F.; Yao, J. T. P.: Structural Control: Past, Present, and Future. In: *Journal of Engineering Mechanics* 123 (9), 1997, S. 897-971. - [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:9\(897\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:9(897))
- HOWARD08 Howard, T. J.; Culley, S. J.; Dekoninck, E.: Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. In: *Design Studies* 29 (4), 2008, S. 160-180. - DOI: 10.1016/j.destud.2008.01.001
- INCOSE21 INCOSE - International Council on Systems Engineering: *What is systems engineering*. Verfügbar unter: <https://www.incose.org/systems-engineering>, zuletzt geprüft am 24.10.2021.
- ISERMANN05 Isermann, R.: *Mechatronic Systems*. London: Springer Verlag, 2005. - ISBN 1852339306.
- IT-PRODUCTION14 it-production: *Systembaukasten für die Produktentwicklung*. Verfügbar unter: <https://www.it-production.com/allgemein/engineering-frameworkssystembaukasten-fuer-die-produktentwicklung/>, zuletzt geprüft am 24.10.2021.
- JACKSTIEN14 Jackstien, K.; Vajna, S.: Grundlagen des Integrated Design Engineering. In: Vajna, S. (Hrsg.): *Integrated Design Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014, S. 51-94. - ISBN 978-3-642-41103-8
- JÄGER18 Jäger, B.: *Interdisziplinäre Entwicklung von adaptiven Fassadenelementen*. Stuttgart, Universität, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Studienarbeit, 2018.
- JULI11 Juli, R.; Lederhofer, E.; Baumgärter, T.: Herausforderungen und Möglichkeiten der Planung - Die Sicht des Planers. In: Günthner, W.; Borrmann, A. (Hrsg.): *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen*. Berlin, Heidelberg, 2011, S. 11-14. - ISBN 978-3-642-16485-9
- KALTE06 Kalte, P.: Bedarfsplanung im Bauwesen. In: *Deutsches Ingenieurblatt*, Ausgabe 07-08/2006, S. 54-57. Verfügbar unter: https://www.ghv-guetestelle.de/media/2006-07-08_dib_bedarfsplanung_.pdf, zuletzt geprüft am 24.10.2021.
- KAMARA02 Kamara, J. M.; Anumba, C. J.; Evbuomwan, N. F. O.: *Capturing client requirements in construction projects*. London: Thomas Telford, 2002. - ISBN 0 7277 3103 3

- KAUFMANN21 Kaufmann, H.; Krötsch, S.; Winter, S.; Geier, S.; Hafner, A.; Huß, W.; König, H.; Kohaus, M.; Lattke, F.; Mindrup, K.; Müller, L.; Niemann, A.; Rüdissler, D.; Schühle, C.; Stieglmeier, M.; Teibinger, M.: *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau: Grundlagen - Konstruktionen - Beispiele*. München: Detail Verlag, 2021. - ISBN 9783955535568
- KLEIN08 Klein, H.: *Basics Projektplanung*. 2. Auflage. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2008. - ISBN 978-3-7643-8468-5
- KLEIN13 Klein, B.: *Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 10. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner-Verlag, 2013. - ISBN 9783658022723
- KNUBBEN14 Knubben, E.: *Untersuchung zur Komfort- und Energieeffizienzsteigerung in Wohnstätten durch Einsatz schaltbarer Öffnungen in Gebäudehüllen zur dezentralen Belüftung*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Dissertation, 2014.
- KÖNKE12 Könke, C.; Krätzig, W.; Meskouris, K.; Petryna, Y.: Theorie der Tragwerke. In: Zilch, K.; Diederichs, C.; Katzenbach, R.; Beckmann, K. (Hrsg.): *Handbuch für Bauingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, S. 205-336. - ISBN 978-3-642-14450-9
- KRAUSE18 Krause, D.; Gebhardt, N.: *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien - hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln*. Berlin: Springer Vieweg, 2018. - ISBN 978-3-662-53039-9
- KRÖNERT10 Krönert, N.: *Anforderungs-Engineering im Bauwesen*. Zürich, ETH Zürich, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Dissertation, 2010.
- LANDOWSKI17 Landowski, D.: *Einzel- oder Generalplaner - die optimale Planereinsatzform*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. - <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54775-5>
- LEISTNER20 Leistner, S.; Honold, C.; Maierhofer, M.; Haase, W.; Blandini, L.; Sobek, W.; Roth, D.; Binz, H.; Menges, A.: *Research on integral design and planning processes for adaptive buildings, Architectural Engineering and Design Management*, 2002. - DOI: 10.1080/17452007.2020.1856031
- LINDEMANN05 Lindemann, U.; Erdell, E.; Schneider, S.: *Transfer von Methoden zur nachhaltigen Entwicklung aus dem Maschinenwesen in das Bauwesen*. München, Technische Universität München, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Abschlussbericht BayFORREST Forschungsprojekt F238, 2005.
- LINDEMANN09 Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2009. - ISBN 978-3-642-01422-2

-
- LINDEMANN16 Lindemann, U.: Von der Mechatronik zu Cyber-Physical-Systems. In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser, 2016, S. 869-875. - ISBN 978-3-446-44518-5
- LORENZ10 Lorenz, P.: *Gebäude entwerfen. Grundlagen, Methoden, Arbeitshilfen*. München: Deutsche Verlags-Anstalt, 2010. - ISBN 978-3-421-03667-4
- MACLEAMY04 MacLeamy, P.: *Collaboration, integrated information and the project lifecycle in building design, construction and operation*. Construction User Roundtable WP-1202, 2004. Verfügbar unter: <https://kcuc.org/wp-content/uploads/2013/11/Collaboration-Integrated-Information-and-the-Project-Lifecycle.pdf>, zuletzt geprüft am 24.10.2021.
- MAIERHOFER19 Maierhofer, M.; Menges, A. (2019). Towards integrative design processes and computational design tools for the design space exploration of adaptive architectural structures. In: Asefi, M.; Gorgolewski, M.: *Proceedings of International Conference on Emerging Technologies in Architectural Design (ICETAD2019)*. Toronto, 2019.
- MESSERLE16 Messerle, M.: Methodik zur Identifizierung der erfolgversprechendsten Produktideen in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation, 2016. - ISBN 978-3-922823-95-7
- MORO09 Moro, J.; Rottner, M.; Alihodzic, B.; Weißbach, M.: *Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail. Band 1 Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2009. - ISBN 978-3-540-40613-6
- NATTERMANN10 Nattermann, R.; Anderl, R.: Approach for a Data-Management-System and a Proceeding-Model for the Development of Adaptronic Systems. In: *Proceedings for the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Volume 3*. Vancouver, 2010, S. 379-387. - <https://doi.org/10.1115/IMECE2010-37828>
- NEUDÖRFER13 Neudörfer, A.: Sicher. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz - Konstruktionslehre - Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung*, 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 505-536. - ISBN 978-3-642-29568-3
- NEUHÄUSER13 Neuhäuser, S.; Weickgenannt, M.; Haase, W.; Sawodny, O.: Adaptive Tragwerke - Aktuelle Forschungen im Ultraleichtbau. In: *Stahlbau 82* (2013), Heft 6, S. 428-437. - DOI: 10.1002/stab.201310057
- NEUHÄUSER14 Neuhäuser, S.: *Untersuchungen zur Homogenisierung von Spannungsfeldern bei adaptiven Schalentragwerken mittels Auflagerverschiebung*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Dissertation, 2014.

- NEUTSCHEL14 Neuschel, B.; Vajna, S.: Organisations- und Prozessintegration. In: Vajna, S. (Hrsg.): *Integrated Design Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014, S. 335-374. - ISBN 978-3-642-41103-8
- NIEMANN09 Niemann, J.; Schuh, G.; Baessler, E.; Eigner, M.; Stolz, M.; Steinhilper, R.; Janusz-Renault, G.: Management des Produktlebenslaufs. In: Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J., Westkämper, E. (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. - ISBN 978-3-540-87595-6
- OSTERTAG19 Ostertag, A.; Toader, N.; Bertsche, B.; Sobek, W.: System-Safety in the Application of Adaptive Load-Bearing Structures. In: *2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2019, pp. 1-6, - ISBN 978-1-5386-6555-8
- OSTERTAG20 Ostertag, A.; Dazer, M.; Bertsche, B.; Schlegl, F.; Albrecht, S.; Leistner, P.; Gienger, A.; Wagner, J.; Tarin, C.; Sawodny, O.: Reliable design of adaptive load-bearing structures with focus on sustainability. In: Baraldi, P.; Di Maio, F.; Zio, E.: *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*. Singapore: Research Publishing, 2020. - ISBN 978-981-14-8593-0
- PAHL07 Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2007. - ISBN 978-3-540-34061-4
- PAHL13 Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Heusel, J.; Bronnhuber, T.; Hufenbach, W.; Helms, O.; Schlick, C.; Klocke, F.; Dilger, K.; Müller, R.: Gestaltungsrichtlinien. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz - Konstruktionslehre - Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung*, 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 583-753. - ISBN 978-3-642-29568-3
- POHL08 Pohl, K.: *Requirements Engineering*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2008. - ISBN 978-3-89864-550-8
- PONN11 Ponn, J.; Lindemann, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. 2. Auflage. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2011. - ISBN 978-3-642-20579-8
- RACKWITZ12 Rackwitz, R.; Zilch, K.: Zuverlässigkeit von Tragwerken. In: Zilch, K.; Diederichs, C.; Katzenbach, R.; Beckmann, K. (Hrsg.): *Handbuch für Bauingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, S. 337-378. - ISBN 978-3-642-14450-9

- RANK12 Rank, E.; Meißner, U.; Rüppel, U.: Bauinformatik. In: Zilch, K.; Diederichs, C.; Katzenbach, R.; Beckmann, K. (Hrsg.): *Handbuch für Bauingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, S. 1-60. - ISBN 978-3-642-14450-9
- ROMMEL93 Rommel, G.; Brück, F.; Diederichs, R.; Kempis, R.; Kluge, J.: *Einfach überlegen. Das Unternehmenskonzept, das die Schlanken schlank und die Schnellen schnell macht*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993. - ISBN 3791006770
- ROTH01 Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 2: Kataloge*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. - ISBN 978-3-540-67026-1
- RUPP14 Rupp, C; die Sophisten: *Requirements Engineering und Management*. München: Carl Hanser, 2014. - ISBN 978-3-446-43893-4
- SAVANOVIC09 Savanovic, P.; Zeiler, W.: Integral design method for conceptual building design. In: Norell Bergendahl, M.; Grimheden, M.; Leifer, L.; Skogstad, P.; Lindemann, U. (Hrsg.): *DS 58-6: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design (ICED)*, Vol. 6, Design Methods and Tools (pt. 2). Palo Alto, 2009, S. 167-178. - ISBN 978-1-904670-10-0
- SCHÄPPI05 Schächli, B.; Andreasen, M.; Kirchgeorg, M.; Radermacher, F.-J. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München, Carl Hanser, 2005. - ISBN-13: 978-3446228382
- SCHLEGL19A Schlegl, F.; Honold, C.; Leistner, S.; Albrecht, S.; Roth, D.; Haase, W.; Leistner, P.; Binz, H.; Sobek, W.: Integration of LCA in the Planning Phases of Adaptive Buildings. In: *Sustainability* Vol. 11, Issue 16 (2019), S. 1-24. - DOI:10.3390/su11164299
- SCHLEGL19B Schlegl, F.; Gantner, J.; Traunspurger, R.; Albrecht, S.; Leistner, P.: LCA of buildings in Germany: Proposal for a future benchmark based on existing databases. In: *Energy and Buildings*, Volume 194 (2019), S. 342-350. - <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.038>.
- SCHMID15 Schmid, F.: *Methodisches Gestalten und systematisches Entwickeln am Beispiel zukünftiger Fassadenlösungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. - ISBN 978-3-658-12212-6
- SCHOLZ18 Scholz, O.: *Konzeption von Sensor-Aktor-Systemen für Adaptive Gebäude innerhalb eines studentischen Architekturwettbewerbs*. Stuttgart, Universität, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Studienarbeit, 2018.
- SCHUH12 Schuh, G.; Eversheim, W.; Lenders, M.: Produktplanung. In: Schuh, G. (Hrsg.): *Innovationsmanagement*. Zweite Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, S. 57-113. - ISBN 978-3-642-25049-1

- SCHULZE16 Schulze, S.-O.: Systems Engineering. In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser, 2016, S. 153-184. - ISBN 978-3-446-44518-5
- SCHILL-FENDL04 Schill-Fendl, M.: *Planungsmethoden in der Architektur*. Norderstedt: BoD - Books on Demand Verlag, 2004. - ISBN-13: 9783833412332
- SENATORE18 Senatore, G.; Duffour, P.; Winslow, P.; Wise, P.: Shape control and whole-life energy assessment of an 'infinitely stiff' prototype adaptive structure. In: *Smart Materials and Structures* 27 (2018) 015022. - <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa8cb8>
- SENATORE19 Senatore, G.; Duffour, P.; Winslow, P.: Synthesis of minimum energy adaptive structures. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization, Volume 60* (2019), S. 849-877. - <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02224-8>
- SFB1244 2021 *Demonstrator-Hochhaus SFB1244 - Projektbeschreibung*. Verfügbar unter: <https://www.sfb1244.uni-stuttgart.de/demonstrator/>, zuletzt geprüft am 24.10.2021.
- SINAPIUS18 Sinapius, J.: *Adaptronik. Prinzipie - Funktionswerkstoffe - Funktionselemente - Zielfelder mit Forschungsbeispielen*. Berlin: Springer Vieweg, 2018. - ISBN 978-3-662-55883-6
- SOBEK14A Sobek, W.: Ultraleichtbau. In: *Stahlbau* 83 (2014), Heft 11, S. 784-789. - DOI: 10.1002/stab.201410211
- SOBEK14B Sobek, W.: Gebäudehüllen - Wie weiter? In: *Bautechnik* 91 (2014), Heft 7, S. 506-517. - DOI: 10.1002/bate.201400038
- SOBEK16A Sobek, W.: Ultraleichtbau. In: Gethmann, D.; Eckhard, P.; Omahna, M.; Peters, S.; Trummer, A.: *GAM - Graz Architecture Magazine* 12. Basel: Birkhäuser, 2016. - ISBN 978-3-0356-0983-7
- SOBEK16B Sobek, W.: Ultra-lightweight construction. In: *International Journal of Space Structures*, Vol. 31-1 (2016), S. 74-80. - DOI: 10.1177/0266351116643246
- SOBEK16C Sobek, W.; Binz, H.; Flaig, C.; Crostack, A.; Herrmann, T.; Haase, W.; Roth, D.: Sicherheitsuntersuchungen eines adaptiven Schalentragswerks - Teil 1: Grundlagen und Theorie der angewandten Methoden. In: *Stahlbau* 85 (2016), Nr. 3, S. 195-199. - <https://doi.org/10.1002/stab.201610368>
- SOBEK16D Sobek, W.; Binz, H.; Flaig, C.; Crostack, A.; Herrmann, T.; Haase, W.; Roth, D.: Sicherheitsuntersuchungen eines adaptiven Schalentragswerks - Teil 2: Anwendung der Fehlerbaumanalyse sowie der Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse. In: *Stahlbau* 85 (2016), Nr. 6, S. 380-386. - <https://doi.org/10.1002/stab.201610383>

- SPATH 16 Spath, D.; Dangelmaier, M.: Produktentwicklung Quo Vadis. In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser, 2016, S. 3-7. - ISBN 978-3-446-44518-5
- TEUFFEL04 Teuffel, P.: *Entwerfen adaptiver Strukturen*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Dissertation, 2004.
- UN17 *World Population Prospects – Population Division – United Nations*. Verfügbar unter: <https://esa.un.org/unpd/wpp/DataQuery/>, zuletzt geprüft am 24.10.2021.
- UNEP09 Jenny Yamamoto, J.; Graham, P. (Hrsg.): *Buildings and Climate Change*. United Nations Environment Programme, 2009. - ISBN 978-92-807-0000-0
- UNEP14 Peduzzi, Pascal: *Sand, rarer than one thinks*. United Nations Environment Programme, 2014. Verfügbar unter: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8665>, zuletzt geprüft am 24.10.2021.
- UNI STUTTGART20A Universität Stuttgart: *Adaptives Tragwerk mit vollintegrierter Aktorik*. Erfinder: Wagner, J.; Böhm, M.; Honold, C.; Burghardt, T.; Haase, W.; Sawodny, O.; Binz, H.; Sobek, W., Deutschland. 27.02.2020. Anmeldetag: 24.08.2018. DE, Patentschrift DE102018214342A1.
- UNI STUTTGART20B Universität Stuttgart: *Tragwerk mit adaptiven Aussteifungselementen*. Erfinder: Wagner, J.; Böhm, M.; Honold, C.; Burghardt, T.; Haase, W.; Sawodny, O.; Binz, H.; Sobek, W., Deutschland. 30.04.2020. Anmeldetag: 25.10.2018. DE, Patentschrift DE102018218260A1.
- VAJNA14A Vajna, S.; Burchardt, C.: Modelle und Vorgehensweisen der Integrierten Produktentwicklung. In: Vajna, S. (Hrsg.): *Integrated Design Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014, S. 3-48. - ISBN 978-3-642-41103-8
- VAJNA14B Vajna, S. (Hrsg.): *Integrated Design Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014. - ISBN 978-3-642-41103-8
- VAN DEN ADEL21 Van den Adel, F.: *Integration von Umweltaspekten in den Planungsprozess adaptiver Gebäude*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Akustik und Bauphysik, Dissertation, 2021. - ISBN 978-3-8396-1727-4
- VERBEECK10 Verbeeck, G.; Hens, H.: Life cycle inventory of buildings: A calculation method. In: *Building and Environment*, Volume 45, Issue 4 (2010), S. 1037-1041. - <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.012>.
- VERSTEEGEN04 Versteegen, G. (Hrsg.): *Anforderungsmanagement*. Berlin: Springer, 2004. - ISBN 978-3-642-18975-3
- VDI17 Kurmann, F.: Auf dem Weg zum vernetzten Bauen. In: *VDI Nachrichten*, Nr. 10, 10.03.2017.

- VDI 2206 2004 VDI 2206 Juni 2004. *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth.
- VDI 2206 2221 VDI 2221 November 2011. *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*. Berlin: Beuth.
- VDI 2221 1993 VDI 2221 Mai 1993. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth.
- VDI 2221-1 2019 VDI 2221 Blatt 1 November 2019. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth.
- VDI 2221-2 2019 VDI 2221 Blatt 2 November 2019. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse*. Berlin: Beuth.
- VDI 2225-3 1998 VDI 2225 Blatt 3 November 1998. *Konstruktionsmethodik: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung*. Berlin: Beuth.
- VDI ZRE14 Becker, N.: *Ressourceneffizienz der Tragwerke*. 2. Auflage. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2014.
- VILASINI12 Vilasini, N.; Neizert, R.; Jayatilaka, P.: Appropriateness of lean production system for the construction industry. In: Senaratne, S.; Sandanayake, Y.: *Proceedings of the World Construction Conference 2012 - Global Challenges in Construction Industry* (Colombo), 2012, S. 355-363. - ISBN 978-955-4516-02-1
- WAGNER17 Wagner, J.; Heidingsfeld, M.; Böhm, M.; Sawodny, O.: Gramian-Based Actuator Placement for Static Load Compensation in Adaptive Structures. In: von Scheven, M.; Keip, M.-A.; Karajan, N. (Hrsg.): *Proceedings of the 7th GACM Colloquium on Computational Mechanics*. Stuttgart: Institute for Structural Mechanics, University of Stuttgart, 2017, S. 49-52.
- WAGNER18 Wagner, J.; Gade, J.; Heidingsfeld, M.; Geiger, F.; von Scheven, M.; Böhm, M.; Bischoff, M.; Sawodny, O.: On steady-state disturbance compensability for actuator placement in adaptive structures. In: *at - Automatisierungstechnik* 66-8 (2018), S. 591–603. - <https://doi.org/10.1515/auto-2017-0099>
- WEEBER05 Weeber, H.; Bosch, S.: *Unternehmenskooperationen und Bauteam-Modelle*. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2005. - ISBN 3-8167-6894-6.
- WEICKGENANNT13 Weickgenannt, M.: *Konzepte zur modellbasierten Regelung adaptiver Schalentragwerke*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik, Dissertation, 2013.

- WEIDNER18 Weidner, S.; Kelleter, C.; Sternberg, P.; Haase, W.; Geiger, F.; Burghardt, T.; Honold, C.; Wagner, J.; Böhm, M.; Bischoff, M.; Sawodny, O.; Binz, H.: The implementation of adaptive elements into an experimental high-rise building. In: *Steel Construction*, Vol. 11 (2018), No. 2, S. 109-117. - <https://doi.org/10.1002/stco.201810019>
- WEIDNER19 Weidner, S.; Steffen, S.; Haase, W.; Sobek, W.; Honold, C.; Burghardt, T.; Binz, H.; Böhm, M.; Wagner, J.; Sawodny, O.: The Integration of Actuation Concepts and Adaptive Elements into an Experimental High-rise Building. In: Zingoni, A.: *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*. London: CRC-Press, 2019, S. 1022-1026. - ISBN 978-1-138-38696-9
- WIGEP18 Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP): *Universitäre Lehre in der Produktentwicklung*. Verfügbar unter: <https://wigep.de/veroeffentlichungen/#leitfaeden>, zuletzt geprüft am 07.02.2023.
- WILBERG17 Kohl, M.; Wilberg, J.; Tommelein, I.; Pikas, E.; Lindemann, U.: Modularization: Exploring opportunities for knowledge transfer between the mechanical engineering and construction industry. In: Maier, A.; Škec, S.; Kim, H.; Kokkolaras, M.; Oehmen, J.; Fadel, G.; Salustri, F.; van der Loos, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)*, Vol. 6: Design Information and Knowledge. Vancouver, 2017, S. 227-236. - ISBN 978-1-904670-94-0
- WILLBERG11 Willberg, U.; Baumgärtel, T.; Klaubert, C.: Von der Grundlagenermittlung bis zum Betrieb - Die Sicht des Bauherrn. In: Günthner, W.; Borrmann, A. (Hrsg.): *Digitale Baustelle - innovativer Planen, effizienter Ausführen*. Berlin, Heidelberg, 2011, S. 8-11. - ISBN 978-3-642-16485-9
- WYNN05 Wynn, D.; Clarkson, J.: Models of designing. In: Clarkson, J.; Eckert, C.: *Design process improvement: A review of current practice*. London: Springer, 2005, S. 34-59. - ISBN 978-1-84628-061-0
- YU10 Yu, A.; Chan, E.: Requirements Management in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry: The Way Forward. In: *Proceedings of the CIB Congress 2010*. Salford, 2010.
- ZAFIROV14 Zafirov, R.: Modellbildung und Spezifikation. In: Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. (Hrsg.): *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014, S. 77-96. - ISBN 978-3-662-43815-2

-
- ZEILER19 Zeiler, W.: An Integral Design Framework for Multi-Disciplinary Design. In: Wartzack, S.; Schleich, B.; Guerreiro Gonçalves, M.; Eisenbart, B.; Völkl, H. (Hrsg.): *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*, Delft, 2019. - <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.6>
- ZIER14 Zier, S.: *Elementarmethoden der Produktentwicklung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2014. - ISBN 978-3-18-342901-1
- ZIRKLER10 Zirkler, S.: *Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte*. München, Technische Universität München, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Dissertation, 2010.

Anhang

A.1 Stuttgart SmartShell

Die Stuttgart SmartShell ist das weltweit erste adaptive Schalentragerwerk und veranschaulicht die Potenziale der Bauweise. Die Struktur mit einer Spannweite von 10 m besteht aus einer vierlagigen, kreuzweise verleimten, 4 cm dicken Holzstruktur. Im Vergleich zu einer konventionellen Bauweise wurde mit diesem Beispiel ein Einsparpotenzial von über 70 % der benötigten Materialien erreicht. [SOBEK16A, S. 166]

Bild A.1 stellt eine Abbildung der realisierten Schale neben der simulierten Vergleichsspannung für zwei Betriebszustände dar. Im abgebildeten Beispiel ist eine Flächenlast auf der gegenüberliegenden Seite des Festlagers angebracht. Um im aktiven Zustand durch äußere Lasten, wie z. B. Wind oder Schnee, resultierende Schwingungen oder Spannungsspitzen zu dämpfen bzw. zu reduzieren, werden an drei der vier Auflager mittels integrierter Hydraulikzylinder kleine Verschiebungen eingebracht. Um die Position der Hydraulikzylinder mit Hilfe einer Echtzeitregelung zu bestimmen, werden kontinuierlich die Spannungen in der Schale mittels Dehnmessstreifen ermittelt. Die wesentliche Planung und Inbetriebnahme erfolgte durch Ingenieure der Tragwerksplanung [NEUHÄUSER14] sowie der Systemdynamik [WEICKGENANNT13].

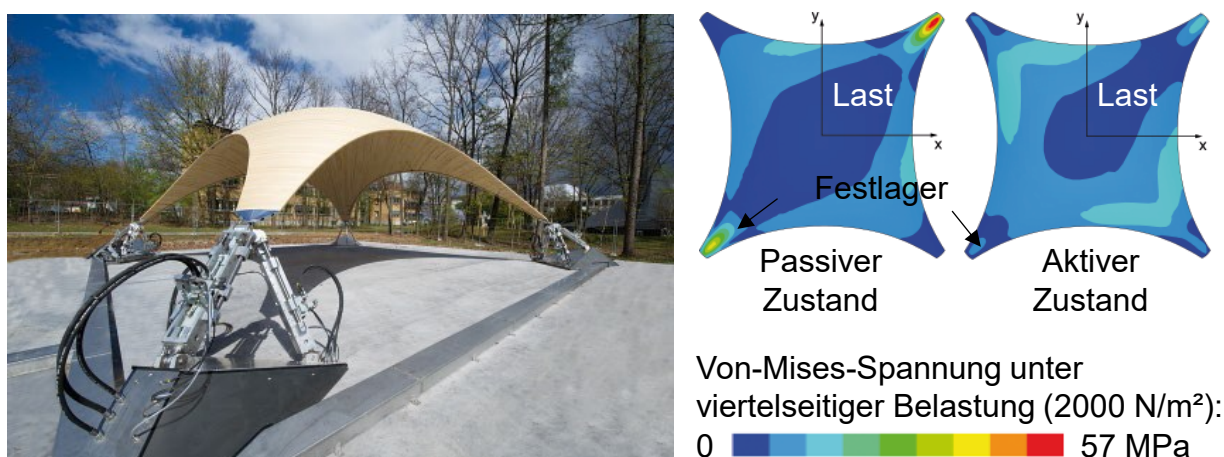


Bild A.1: Adaptives Schalentragerwerk Stuttgart SmartShell basierend auf Neuhäuser [NEUHÄUSER13, S. 432 und S. 435]

A.2 Leistungsbild der Tragwerksplanung



Bild A.2: Leistungsbild „Tragwerksplanung“ (Grundleistungen) nach HOAI [HOAI13, Anl. 14]

A.3 Darstellungsarten von Abläufen

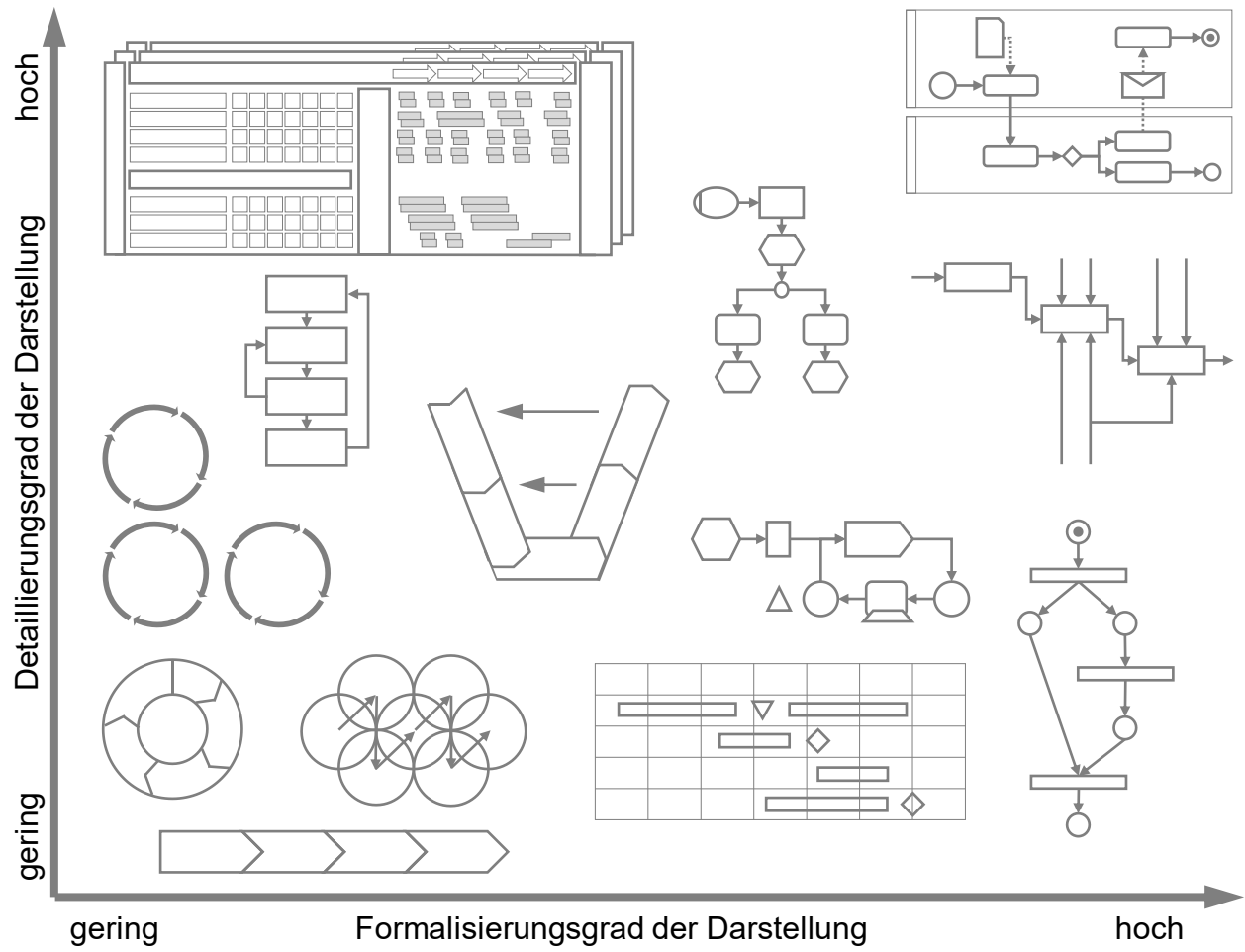


Bild A.3: Darstellungsarten von Abläufen nach VDI 2221 [VDI 2221-1 2019, S. 16]

A.4 Hauptmerkmale nach Pahl und Beitz

Konzept		Produktlebensphasen	
Stoff - Ein- und Ausgangsprodukte: • chemische Eigenschaften • physikalische Eigenschaften - Hilfsstoffe - vorgeschriebene Werkstoffe (Nahrungsmittelgesetz u. ä.) - Materialfluss und -transport	Elektrik/Elektronik - Nennspannung - Nennströme - Netzschwankungen - Sicherung - Schirmung - Filterung - EMV - Anschluss - Verdrahtung - Isolation - Luft-/Kriechstrecken - Stecker - Modulordnung - Funktionsgruppen - SMD-Bauteile - Bauteilverfügbarkeit - Zugänglichkeit - Austausch	Einkauf - Make-or-Buy-Strategie - A-Lieferanten - Local-Content - Katalogbaugruppen - operativer/strategischer Einkauf - Datenaustausch	Instandhaltung - Wartungsfreiheit bzw. Anzahl und Zeitbedarf der Wartung - Inspektion - Austausch und Instandsetzung - Reinigung - Schmierung - Einsatzort
Energie - Leistung - Verlust - Wirkungsgrad - Zustandsgrößen: • Druck • Temperatur - Erwärmung - Kühlung - Anschlussenergie - Speicherung - Arbeitsaufnahme - Energieumformung	Software - Integration - Schnittstellen - Updates - Hardware - Testbarkeit - Notbetrieb	Fertigung - Einschränkung durch Produktionsstätte - größte herstellbare Abmessung - bevorzugtes Fertigungsverfahren - Fertigungsmittel - mögliche Qualität und Toleranzen	Recycling - Wiederverwendung - Entsorgung - Endlagerung - Beseitigung - Schad- und Gefahrstoffe - recyclingkritische Stoffe - Zugänglichkeit - Lösbarkeit
Signal - Ein- und Ausgangssignale - Anzeigeart - Betriebsgeräte - Überwachungsgeräte - Signalform	Signal - Unmittelbare Sicherheitstechnik - Mittelbare Sicherheitstechnik - Hinweisende Sicherheitstechnik - Betriebssicherheit - Arbeitssicherheit - Umweltsicherheit - Gefährdungspotenzial - Grenzkrisiko - Risikobewertung	Kontrolle - Mess- und Prüfmöglichkeit - besondere Vorschriften (z. B. TÜV, DIN, ISO)	Transport - Begrenzung durch Hebezeuge - Bahnprofil - Transportwege nach Größe und Gewicht - Versandart und -bedingungen - Lieferzeit
Geometrie - Abmaße/Dimensionen - Durchmesser - Bauraum - Anzahl - Anordnung - Anschluss - Erweiterung	Ergonomie - Mensch-Maschine-Beziehung - Anzeige- und Bedienelemente: • Bedienung • Bedienungsart • Übersichtlichkeit • Beleuchtung - Anthropometrische Maße - Bedienkräfte - Taktile Kodierung - Haptik	Montage - besondere Montagevorschriften - Zusammenbau - Einbau - Baustellenmontage - Fundamentierung - Werkzeuge - Hilfsstoffe - Sicherheitsdatenblätter	Gebrauch - Geräuscharm - Verschleißrate - Anwendung und Absatzgebiet - Einsatzort (z. B. schwefelige Atmosphäre, Tropen, ...) - Feuchtigkeit - Dienstleistung
Mechanik - Gewicht - Last - Kräfte: • statisch • dynamisch - Reibung - Wärmespannung - Stabilität - Festigkeit: • Verformung • Steifigkeit - Kinematik: • Bewegungsart und -richtung • Beschleunigung • Geschwindigkeit - Kinetik: • Federeigenschaften • Resonanzen	Industrial Design - Bedeutung - Ästhetische Funktionen - Anzeichenfunktionen - Symbolfunktionen - Produktwiedererkennungswert - Farbgebung - Sinus-Milieu	Organisation	
		Planung - max. zulässige Herstellkosten - Werkzeugkosten - Investitionen - Amortisation - Ende der Entwicklung - Liefertermin - Netzplan für Zwischenschritte - Pönalen - Unternehmens-Know-how	Nachhaltigkeit - Öko-Bilanz - Energieeffizienz - Systemkosten Markt - Wettbewerber - Kundensegmente - Kundenverhalten und -bedürfnisse - marktüblicher Standard - Verkaufszahlen - Trends

Bild 10.4: Hauptmerkmalliste zur Anforderungsermittlung [FELDHUSEN13C, S. 331]

A.5 Fragebogen zur Evaluation der Ergebnisse

Bitte beantworten Sie stichwortartig folgende Fragen zur Evaluation der Forschungsergebnisse.

Dokumentation der Planung des Experimentalhochhauses

1. Inwiefern gibt die abstrahierte Darstellung die Prozessschritte und Aktivitäten während der Entwurfsphase der Planung des Experimentalhochhauses wieder?
2. Umfassen die vorgestellten Aspekte die wesentlichen Herausforderungen während der Planung des Experimentalhochhauses oder fehlen welche?

Definition des Unterstützungsbedarfs

3. Inwiefern stimmt der identifizierte Unterstützungsbedarf mit Ihrem Bedarf / Ihren Wünschen hinsichtlich einer methodischen Unterstützung des Planungsprozesses für die zukünftige Planung adaptiver Tragwerke überein?
4. Inwiefern sind die vorgestellten Anforderungen eine geeignete Grundlage für die Entwicklung eines Planungsprozesses für adaptive Tragwerkssysteme?
5. Inwiefern sind die vorgestellten Anforderungen an einen Planungsprozess für die Planung eines adaptiven Tragwerks vollständig definiert?

Methodenbaukasten

6. Inwiefern stimmen Sie dem vorgestellten Bedarf und der Zielsetzung der Entwicklung des Methodenbaukastens zu?
7. Inwiefern sehen Sie die Sammlung von Lösungsansätzen zur Entwicklung des Methodenbaukastens als geeignete Grundlage an, um Methoden für die Planung adaptiver Gebäude zielgerichtet bereitstellen und auswählen zu können?
8. Inwiefern können Sie sich vorstellen, die (bereits veröffentlichte) Methodenlandkarte bei aufkommenden Problemstellungen zur Auswahl geeigneter Methoden anzuwenden?

Integration der LCA-Methodik

9. Inwiefern ist aus Ihrer Sicht die LCA-Methodik zur systematischen Reduktion von Umweltwirkungen während der Planung anwendbar?
10. Inwiefern können mit Hilfe der vorgestellten LCA-Methodik Umweltwirkungen während der Planung reduziert werden?
11. Inwiefern stellt die LCA-Methodik eine Unterstützung für zukünftige Planungsprojekte adaptiver Tragwerke dar?

Prozess für die Planung adaptiver Tragwerkssysteme

12. Stellt der Prozess die angestrebte interdisziplinäre Zusammenarbeit sicher?
13. Ist der Prozess in dem gewählten Abstraktionsgrad vollständig definiert oder fehlt ein Schritt?
14. Passen die einzelnen Schritte des Planungsprozesses zueinander?
15. Inwiefern kann der Prozess in der vorliegenden Form durchgeführt werden?
16. Inwiefern stellt der Prozess eine Unterstützung für zukünftige Planungsprojekte adaptiver Tragwerke dar?

Vernetzung von Methoden und Prozess

17. Inwiefern unterstützt die dargestellte Vernetzung von Methoden und Prozess die Planung adaptiver Tragwerke?
18. Inwiefern können Sie sich vorstellen, den Methodenbaukasten bei zukünftigen Planungsprojekten adaptiver Tragwerke anzuwenden?

Requirements Engineering Ansatz

19. Inwiefern unterstützt die Webapp das interdisziplinäre Erfassen von Anforderungen und das anschließende Anforderungsmanagement im Kontext adaptiver Gebäude?
20. Inwiefern stellen die Hauptmerkmale eines adaptiven Tragwerks eine Unterstützung dar, um sukzessive während der Planung eine umfassende Anforderungsdefinition zu erstellen?

Bewertungsansatz

21. Inwiefern ist die Bewertung von Tragwerkskonzepten nach der Konzeptphase mit Hilfe des vorgestellten Bewertungsansatzes zweckmäßig realisierbar?
22. Inwiefern stellt der Bewertungsansatz eine Unterstützung für die Auswahl adaptiver Tragwerkskonzepte bei zukünftigen Planungsprojekten dar?

Fazit

23. Wie nützlich halten Sie die vorgestellte methodische Unterstützung im Gesamtkontext? Welche Vor- und Nachteile erkennen Sie?
24. Würden Sie die vorgestellte Unterstützung bei der zukünftigen Planung eines adaptiven Tragwerks anwenden?

Ausblick

25. Welchen weiteren Unterstützungsbedarf erkennen Sie in diesem Kontext?

Vielen Dank für Ihre Antworten!

A.6 Leistungsdiagramm verschiedener Aktoren

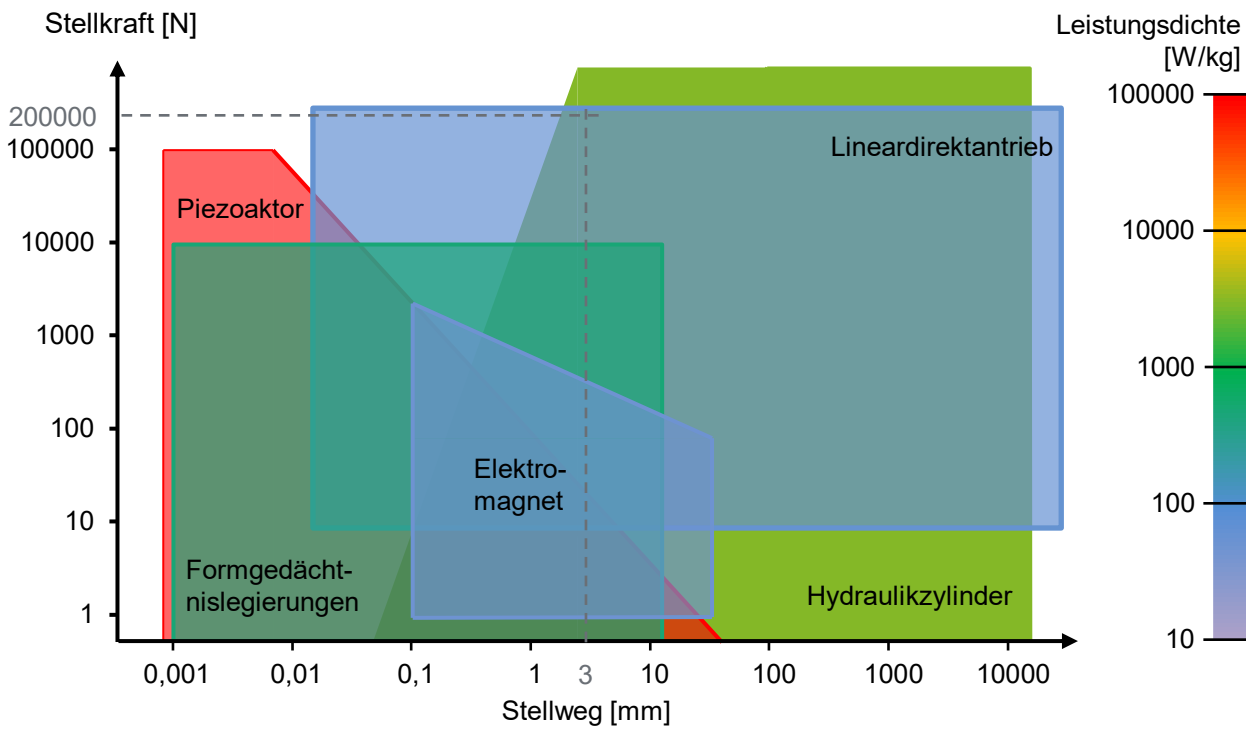
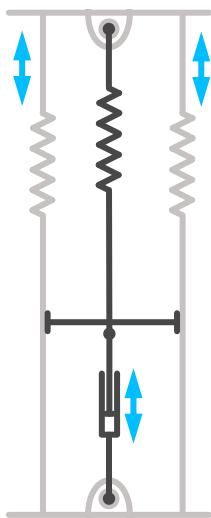


Bild A.5: Gegenüberstellung verschiedener Aktortypen [WEIDNER18, S. 114]

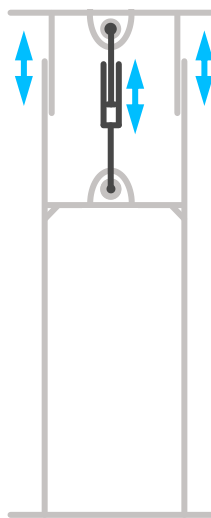
A.7 Ansatz eines Konstruktionskatalogs für Wirkprinzipien

In Bild A.6 sind Wirkprinzipien adaptiver Stützen und Aussteifungselemente dargestellt. Die abgebildeten Prinzipien waren bei der Entwicklung des adaptiven Tragwerks des Experimentalhochhauses potenzielle Lösungsalternativen. Der dargestellte Umfang an Lösungsalternativen wird jedoch bislang einem Konstruktionskatalog, wie er von Roth [ROTH01] bekannt ist, nicht gerecht. Deshalb ist Bild A.6 als Ansatz für einen weiter auszuentwickelnden Konstruktionskatalog zu verstehen.

Adaptive Stütze



Parallele Integration



Serielle Integration

Adaptives Aussteifungselement

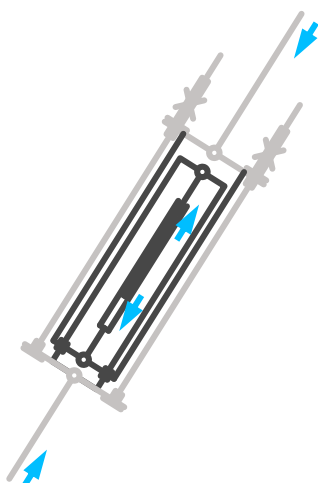
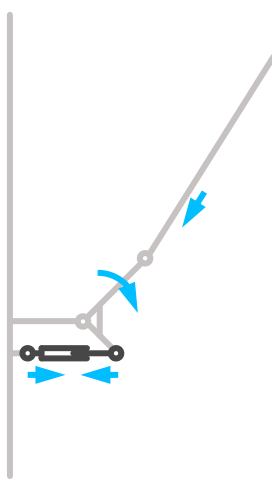
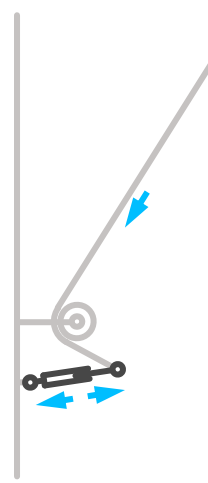
Serielle Integration
im Aussteifungselement
mit HilfskonstruktionSerielle Integration
mit Hebelmechanismus
an Stütze angebundenSerielle Integration
mit Seilrollenmechanismus
an Stütze angebunden

Bild A.6: Ansatz eines Konstruktionskatalogs für Wirkprinzipien

A.8 Abbildung Funktionsprototyp der Aktorik



Bild A.7: CAD-Modell des Funktionsprototypen der Aktorik



Bild A.8: CAD-Modell und fotografische Aufnahme des Funktionsprototypen der Aktorik [WEIDNER19, S. 4 f.]

A.9 Formblatt zur Evaluation der Anforderungsdefinition

Treffen folgende Anforderungen an den Planungsprozess zu?

Bitte kennzeichnen Sie Anforderungen, die Sie für besonders relevant halten.

Anforderungen an das prozessuale Vorgehen	Zutreffend		Hohe Relevanz
	nein	ja	
1. Die Prozessschritte und jeweilige Aktivitäten zur Planung adaptiver Tragwerksysteme sind vollständig und redundanzfrei abzugrenzen.			
2. Das Vorgehen ist von den Leistungsphasen der HOAI zu entkoppeln, jedoch sollen bisherige Planungsgewohnheiten berücksichtigt bleiben.			
3. Der Entwurf bzw. das Erarbeiten eines Tragwerkskonzepts muss unmittelbar unter Berücksichtigung möglicher adaptiver Funktionalitäten bzw. der Integration adaptiver Elemente erfolgen [vgl. Honold19a, S. 8].			
4. Anforderungen sind frühzeitig interdisziplinär zu definieren und anschließend ist für unvermeidbare Änderungen ein konsequentes Anforderungsmanagement vorzusehen [vgl. Honold19a, S. 8].			
5. Im Prozess sind während des Entwurfsstadiums Zeiträume für iterative Tätigkeiten mit anschließender Synthese im Sinne einer Konzeptphase gezielt einzuräumen [vgl. Honold19a, S. 8].			
6. Für die Berücksichtigung bzw. Rückkopplung von Anforderungen aus dem gesamten Lebenszyklus muss der Prozess die Zeitspanne von der Planung bis zum Rückbau abbilden.			
7. Das prozessuale Vorgehen ist durch Vorschläge bezüglich geeigneter Methoden Anwendungen zu unterstützen.			

Anforderungen an das interdisziplinäre Vorgehen			
8. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit muss mit der Bedarfserhebung des Entwurfsprozesses beginnen [vgl. Honold19a, S. 8].			
9. Aufgabenbereiche und Zuständigkeiten sind den Planungsbeteiligten klar zuzuordnen und die Schnittstellen zu kennzeichnen [vgl. Honold19a, S. 8].			
10. Der Informations- und Datenaustausch unter den beteiligten Disziplinen ist mit festgelegten Intervallen bzw. Zeitpunkten sicherzustellen, beispielsweise mit Meilensteinen [vgl. Honold19a, S. 8].			
11. Die Nutzung gemeinsamer Modelle wie CAD- oder Simulationsmodelle ist anzustreben [vgl. Honold19a, S. 8].			

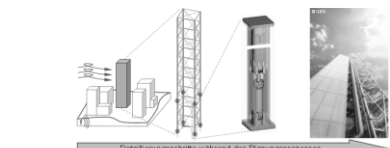
Anforderungen an die Methoden Anwendungen			
12. Bewährte Methoden bei der Planung des Experimentalhochhauses sind bei der Erarbeitung der methodischen Unterstützung zu berücksichtigen [vgl. Honold19a, S. 8].			
13. Weitere etablierte oder im Forschungsstadium befindliche Methoden zur Unterstützung des Prozesses (z. B. Bewertung der Umweltwirkungen von Entwurfsvarianten, Sicherheits- und Ausfallkonzepte, digitale Planungs- und Entwurfswerkzeuge für adaptive Systeme) sind im Prozess zu integrieren [vgl. Honold19a, S. 8].			
14. Bewährte Methoden sind in Form eines Methodenbaukastens zu sammeln und mit dem Prozessmodell zu verknüpfen [vgl. Honold19a, S. 8].			

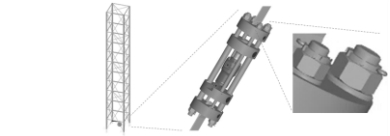
Vielen Dank für Ihre Antworten!

A.10 Steckbriefe zu neuentwickelten bzw. transferierten Methoden

Hauptmerkmale für die Anforderungsdefinition		SFB 1244 Methodenbaukasten																		
Bezeichnung der Methode																				
Werkzeug Methodentyp	Honold, A01, IKTD Name, Teilprojekt, Institut																			
<p>Die Sammlung von Hauptmerkmalen und zugehörigen Kriterien zur Anforderungsdefinition dienen als Unterstützung bei der Erstellung einer strukturierten und vollständigen Anforderungsliste als Bestandteil des Requirements Engineering. Durch die Sammlung an Schlagworten soll mittels Assoziation für den jeweiligen Anwendungsfall auf zutreffende bzw. benötigte Anforderungen hingewiesen werden.</p> <p>Methodenbeschreibung (Zweck und Funktion)</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Hauptmerkmal</th> <th>Anforderung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gebäude</td> <td>Bauypologie (z. B. Hochhaus); Nutzungsart; Bauform/Kubatur; Gebäudeklasse; Grundfläche; Höhe; Erschließung; Lebensdauer</td> </tr> <tr> <td>Tragwerkssystem</td> <td>Bauweise (Stabwerk/Fächentragwerk); Konstruktionsart (Massiv-/Leichtbauweise); Einflussgrößen; Belastungssituation (statisch, schwellend, wechselnd); Lastgrößen/Lastmittelarten; Verbindungstypen (z. B. gelenkig); Eigenfrequenzen</td> </tr> <tr> <td>Tragwerkelemente</td> <td>Bauteileigenschaften (z. B. Baustoff für Gründung, Stützen, Wände, Balken, Decken); Bauverfahren (z. B. Fertigteilbau)</td> </tr> <tr> <td>Konzeption Aktorik</td> <td>Adaptionsprinzip; Ziel der Regelung (z. B. statische Kompensation von Laststößen; Adaption von Steifigkeitseigenschaften; Reduktion von Verformungen); Aktuerungskonzept; Wirkbewegung; Aktorposition(en); Integrationsart (seriell, parallel, steifigkeitsveränderlich); Krafteinleitung; Stell-Haltekraft bzw. Amplitude und Frequenz der Aktorkräfte; Vorspannkraft; Stellgeschwindigkeit; Aktuierungshäufigkeit; Auslegungphilosophie (statisch, zeitfest, dauerfest); Dämpfungseigenschaften; Energieart (elektrisch, mechanisch, piezo-mechanisch, hydraulisch, pneumatisch); Modularisierung</td> </tr> <tr> <td>Geometrie</td> <td>Bauraumabmessungen und Schnittstellegeometrie für Aktorik; Anschlussmaße; Zu- und Ableitungen; Maßtoleranzen; Grenzmaße für Transport</td> </tr> <tr> <td>Regelung</td> <td>Regelgröße; Zustandsgrößen; Störgrößen; Regeltyp; Regelalgorithmus; Zustandsbeschränkungen (z. B. max. Auslenkung; max. Verformung)</td> </tr> <tr> <td>Aktor</td> <td>Nennposition; Referenzierung; Bauraumabmessungen und Schnittstellegeometrie für Aktor (sowie weitere Anforderungen aus „Konzeption“, sofern aufgrund von Umienkung, Hebelkonstruktionen etc. abweichend vom eigentlichen Stellelement)</td> </tr> <tr> <td>Sensor</td> <td>Messgröße; Mess-/Wirkprinzip; Messbereich; Messfrequenz/Abtastrate;</td> </tr> </tbody> </table>	Hauptmerkmal	Anforderung	Gebäude	Bauypologie (z. B. Hochhaus); Nutzungsart; Bauform/Kubatur; Gebäudeklasse; Grundfläche; Höhe; Erschließung; Lebensdauer	Tragwerkssystem	Bauweise (Stabwerk/Fächentragwerk); Konstruktionsart (Massiv-/Leichtbauweise); Einflussgrößen; Belastungssituation (statisch, schwellend, wechselnd); Lastgrößen/Lastmittelarten; Verbindungstypen (z. B. gelenkig); Eigenfrequenzen	Tragwerkelemente	Bauteileigenschaften (z. B. Baustoff für Gründung, Stützen, Wände, Balken, Decken); Bauverfahren (z. B. Fertigteilbau)	Konzeption Aktorik	Adaptionsprinzip; Ziel der Regelung (z. B. statische Kompensation von Laststößen; Adaption von Steifigkeitseigenschaften; Reduktion von Verformungen); Aktuerungskonzept; Wirkbewegung; Aktorposition(en); Integrationsart (seriell, parallel, steifigkeitsveränderlich); Krafteinleitung; Stell-Haltekraft bzw. Amplitude und Frequenz der Aktorkräfte; Vorspannkraft; Stellgeschwindigkeit; Aktuierungshäufigkeit; Auslegungphilosophie (statisch, zeitfest, dauerfest); Dämpfungseigenschaften; Energieart (elektrisch, mechanisch, piezo-mechanisch, hydraulisch, pneumatisch); Modularisierung	Geometrie	Bauraumabmessungen und Schnittstellegeometrie für Aktorik; Anschlussmaße; Zu- und Ableitungen; Maßtoleranzen; Grenzmaße für Transport	Regelung	Regelgröße; Zustandsgrößen; Störgrößen; Regeltyp; Regelalgorithmus; Zustandsbeschränkungen (z. B. max. Auslenkung; max. Verformung)	Aktor	Nennposition; Referenzierung; Bauraumabmessungen und Schnittstellegeometrie für Aktor (sowie weitere Anforderungen aus „Konzeption“, sofern aufgrund von Umienkung, Hebelkonstruktionen etc. abweichend vom eigentlichen Stellelement)	Sensor	Messgröße; Mess-/Wirkprinzip; Messbereich; Messfrequenz/Abtastrate;
Hauptmerkmal	Anforderung																			
Gebäude	Bauypologie (z. B. Hochhaus); Nutzungsart; Bauform/Kubatur; Gebäudeklasse; Grundfläche; Höhe; Erschließung; Lebensdauer																			
Tragwerkssystem	Bauweise (Stabwerk/Fächentragwerk); Konstruktionsart (Massiv-/Leichtbauweise); Einflussgrößen; Belastungssituation (statisch, schwellend, wechselnd); Lastgrößen/Lastmittelarten; Verbindungstypen (z. B. gelenkig); Eigenfrequenzen																			
Tragwerkelemente	Bauteileigenschaften (z. B. Baustoff für Gründung, Stützen, Wände, Balken, Decken); Bauverfahren (z. B. Fertigteilbau)																			
Konzeption Aktorik	Adaptionsprinzip; Ziel der Regelung (z. B. statische Kompensation von Laststößen; Adaption von Steifigkeitseigenschaften; Reduktion von Verformungen); Aktuerungskonzept; Wirkbewegung; Aktorposition(en); Integrationsart (seriell, parallel, steifigkeitsveränderlich); Krafteinleitung; Stell-Haltekraft bzw. Amplitude und Frequenz der Aktorkräfte; Vorspannkraft; Stellgeschwindigkeit; Aktuierungshäufigkeit; Auslegungphilosophie (statisch, zeitfest, dauerfest); Dämpfungseigenschaften; Energieart (elektrisch, mechanisch, piezo-mechanisch, hydraulisch, pneumatisch); Modularisierung																			
Geometrie	Bauraumabmessungen und Schnittstellegeometrie für Aktorik; Anschlussmaße; Zu- und Ableitungen; Maßtoleranzen; Grenzmaße für Transport																			
Regelung	Regelgröße; Zustandsgrößen; Störgrößen; Regeltyp; Regelalgorithmus; Zustandsbeschränkungen (z. B. max. Auslenkung; max. Verformung)																			
Aktor	Nennposition; Referenzierung; Bauraumabmessungen und Schnittstellegeometrie für Aktor (sowie weitere Anforderungen aus „Konzeption“, sofern aufgrund von Umienkung, Hebelkonstruktionen etc. abweichend vom eigentlichen Stellelement)																			
Sensor	Messgröße; Mess-/Wirkprinzip; Messbereich; Messfrequenz/Abtastrate;																			
<p>Die Hauptmerkmale eignen sich zur Kategorisierung von untergeordneten Anforderungen bzw. für eine anderweitige thematische Strukturierung.</p> <p>Ergebnis (Ausgangsinformationen und Ergebnisform)</p>		<p>Visualisierung</p> <p>Projektmanagement Verantwortliche Disziplin/Fachbereich</p>																		
<p>Aufgabenstellung bzw. Projektziele, weitere Randbedingungen Benötigte Vorarbeit/Eingangsinformationen</p>		<p>Bedarfserhebung bis Realisierung Phase/Arbeitsabschnitt</p>																		
<p>Stakeholder und Vertreter aus den beteiligten Fachdisziplinen Erforderliche Ressourcen, z. B. weiteres (Fach-)Personal, Software etc.</p>		<p>siehe Requirements Engineering Zeitlicher Aufwand</p>																		
<p>Die Hauptmerkmale und Kriterien können auch beim Aufstellen von Kriterien zur Bewertung vorliegender Konzepte weiterhelfen. Hinweise/Sonstiges (z. B. erforderliche Annahmen)</p>		<p>Kapitel 8.4.3, Anhang A.4 Literaturverweis</p>																		

Konstruktionskatalog für Wirkprinzipien adaptiver Tragwerkselemente		SFB 1244 Methodenbaukasten
Bezeichnung der Methode		
Werkzeug zur diskursiven Lösungssuche Methodentyp	Honold, A01, IKTD Name, Teilprojekt, Institut	
<p>Die Sammlung von konstruktiven Lösungsprinzipien für eine vorgegebene Problemstellung dient zur diskursiven Lösungsfindung. Für einen vorliegenden Anwendungsfall kann mit Hilfe des Konstruktionskatalogs eine bestehende Lösung übertragen oder durch Assoziation eine ähnliche Lösung abgeleitet werden.</p> <p>Methodenbeschreibung (Zweck und Funktion)</p>		<p>Parallele Integration Serielle Integration</p>
<p>Konstruktive Lösung als Prinzipdarstellung, die in weiteren Schritten zu detaillieren und ggf. dem Lösungsraum weiter anzupassen ist.</p> <p>Ergebnis (Ausgangsinformationen und Ergebnisform)</p>		<p>Visualisierung</p> <p>Tragwerksplanung, Maschinenbau, Systemdynamik Verantwortliche Disziplin/Fachbereich</p>
<p>Randbedingungen und Anforderungen, die der Lösung unterliegen Benötigte Vorarbeit/Eingangsinformationen</p>		<p>Konzeptphase Phase/Arbeitsabschnitt</p>
<p>Workshop zur Bewertung der (vorausgewählten) Lösungsprinzipien Erforderliche Ressourcen, z. B. weiteres (Fach-)Personal, Software etc.</p>		<p>gering Zeitlicher Aufwand</p>
<p>- Hinweise/Sonstiges (z. B. erforderliche Annahmen)</p>		<p>Anhang A.7 Literaturverweis</p>

LCA-Bilanzierung		SFB 1244 Methodenbaukasten																				
Bezeichnung der Methode																						
Methodik zur Nachhaltigkeitsbewertung	Schlegl/Honold/Leistner, D02/A01, IABP/	SFB 1244 Methodenbaukasten																				
Methodentyp	Name, Teilprojekt, Institut IKTD/ILEK																					
<p>Mehrstufige Methodik zur Bewertung der Umweltwirkungen eines im Planungsstadium befindlichen Gebäudes und der frühzeitigen Identifikation des Potenzials einer Integration adaptiver Systeme. Die erste Bewertungsstufe sieht in frühen Phasen eine Potenzialfindung durch den Vergleich mit den Kenngrößen bestehender Gebäude vor. In der Konzeptphase dient die Bewertung zur Konzeptauswahl und die Bewertung nach der Realisierung als Grundlage zukünftiger Gebäude.</p> <p>Methodenbeschreibung (Zweck und Funktion)</p>		 <table border="1" data-bbox="1045 515 1436 683"> <thead> <tr> <th>Planungsstadium</th> <th>Grundlagenermittlung</th> <th>Vorentwurf bzw. Konzeptphase und Entwurf</th> <th>Ausführungsplanung und Vergabeprozess</th> <th>Objektüberwachung und Betrieb</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LCA-Phase</td> <td>Vergleichende LCA</td> <td>Prognostizierende LCA</td> <td>Detaillierte LCA</td> <td>Vollständige LCA</td> </tr> <tr> <td>Ermittlung des Massenbedarfs</td> <td>Schätzung auf Grundlage von Umwelteinflüssen und dem Vergleich mit bestehenden Referenzgebäuden</td> <td>Schätzung auf Grundlage von Hochrechnungen und Vergleich von Konzeptparametern unterschiedlicher Adaptionsniveaus</td> <td>Ermittlung auf Grundlage von CAD-Modellen und Leistungsverzeichnissen</td> <td>Mengenermittlung auf Grundlage von Liefer scheinen und Aufmaßen</td> </tr> <tr> <td>Ermittlung des Energiebedarfs</td> <td></td> <td>Schätzung auf Grundlage von Simulationen und Erfahrungswerten</td> <td></td> <td>Bestimmung durch Messvorgänge</td> </tr> </tbody> </table>	Planungsstadium	Grundlagenermittlung	Vorentwurf bzw. Konzeptphase und Entwurf	Ausführungsplanung und Vergabeprozess	Objektüberwachung und Betrieb	LCA-Phase	Vergleichende LCA	Prognostizierende LCA	Detaillierte LCA	Vollständige LCA	Ermittlung des Massenbedarfs	Schätzung auf Grundlage von Umwelteinflüssen und dem Vergleich mit bestehenden Referenzgebäuden	Schätzung auf Grundlage von Hochrechnungen und Vergleich von Konzeptparametern unterschiedlicher Adaptionsniveaus	Ermittlung auf Grundlage von CAD-Modellen und Leistungsverzeichnissen	Mengenermittlung auf Grundlage von Liefer scheinen und Aufmaßen	Ermittlung des Energiebedarfs		Schätzung auf Grundlage von Simulationen und Erfahrungswerten		Bestimmung durch Messvorgänge
Planungsstadium	Grundlagenermittlung	Vorentwurf bzw. Konzeptphase und Entwurf	Ausführungsplanung und Vergabeprozess	Objektüberwachung und Betrieb																		
LCA-Phase	Vergleichende LCA	Prognostizierende LCA	Detaillierte LCA	Vollständige LCA																		
Ermittlung des Massenbedarfs	Schätzung auf Grundlage von Umwelteinflüssen und dem Vergleich mit bestehenden Referenzgebäuden	Schätzung auf Grundlage von Hochrechnungen und Vergleich von Konzeptparametern unterschiedlicher Adaptionsniveaus	Ermittlung auf Grundlage von CAD-Modellen und Leistungsverzeichnissen	Mengenermittlung auf Grundlage von Liefer scheinen und Aufmaßen																		
Ermittlung des Energiebedarfs		Schätzung auf Grundlage von Simulationen und Erfahrungswerten		Bestimmung durch Messvorgänge																		
<p>Nach qualitativen Bewertungsergebnissen in frühen Phasen liefert die Methodik mit zunehmendem Detaillierungsgrad der Planungsergebnisse quantifizierte Werte bzgl. des Material- und Energiebedarfs und somit den resultierenden Umweltwirkungen (im Betrieb).</p> <p>Ergebnis (Ausgangsinformationen und Ergebnisform)</p>		<p>Visualisierung</p> <p>Umweltbilanzierung, Sonstige Verantwortliche Disziplin/Fachbereich</p>																				
<p>Entsprechend des Bewertungszeitraums zunehmende Planungsdetails</p> <p>Benötigte Vorarbeit/Eingangsinformationen</p>		<p>prozessübergreifend</p> <p>Phase/Arbeitsabschnitt</p>																				
<p>Software zur LCA-Bewertung</p> <p>Erforderliche Ressourcen, z. B. weiteres (Fach-)Personal, Software etc.</p>		<p>sehr hoch (je nach Projektumfang)</p> <p>Zeitlicher Aufwand</p>																				
<p>Bewertungsergebnis beruht in frühen Phasen auf getroffenen Annahmen</p> <p>Hinweise/Sonstiges (z. B. erforderliche Annahmen)</p>		<p>Kapitel 8.3.3</p> <p>Literaturverweis</p>																				

Methode zur systematischen Berücksichtigung der konstruktiven Sicherheit		SFB 1244 Methodenbaukasten												
Bezeichnung der Methode														
Bewertungsmethode	Honold/Ostertag, A01/B03, IKTD/IMA	SFB 1244 Methodenbaukasten												
Methodentyp	Name, Teilprojekt, Institut													
<p>Ermittlung von potenziell eintretenden Fehlerfällen, die durch die Konstruktion des adaptiven Systems in verschiedenen (Betriebs-) Situationen eintreten können. Für diesen Zweck werden auf verschiedenen Abstraktionsebenen wiederholt Gefährdungs- und Risikoanalysen durchgeführt, Fehlerursache und -folge analysiert und Optimierungspotenziale abgeleitet. Mögliche Fehlerfälle lassen sich mittels Fehlerbaum oder FMEA identifizieren.</p> <p>Methodenbeschreibung (Zweck und Funktion)</p>		 <table border="1" data-bbox="1045 1467 1436 1612"> <thead> <tr> <th>Fokus</th> <th>Gesamtsystemebene</th> <th>Baugruppenebene</th> <th>Bauteilebene</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ziel des Prozessschritts</td> <td>• Identifikation von sicherheitskritischen Fehlerfällen und deren Auswirkungen • Definition von Sicherheitsanforderungen</td> <td>• Analyse und Bewertung konstruktiver Lösungen hinsichtlich sicherheitskritischer Fehlerfälle und Zustände • Soll-Ist Abgleich mit definierten Anforderungen</td> <td>• Analyse von Bauteilen hinsichtlich sicherheitskritischer Fehler und deren Ausfälle • Soll-Ist Abgleich mit definierten Anforderungen</td> </tr> <tr> <td>Beispiel eines identifizierten, potenziellen Fehlerfalls und Lösungssatz</td> <td>Fehlerfall: „Ausfall der Energiezufuhr“ Konstruktive Sicherstellung einer Messtorgangweise im Auslieferungszustand</td> <td>Fehlerfall: „Toleranzabgleich in Längsrichtung“ Nennposition der Aktork ist ungleich der Nennposition des Aktors</td> <td>Fehlerfall: „Lösen der Vorspannmutter durch Vibrationen“ Verwendung von Kriechmutter (Formschlüss)</td> </tr> </tbody> </table>	Fokus	Gesamtsystemebene	Baugruppenebene	Bauteilebene	Ziel des Prozessschritts	• Identifikation von sicherheitskritischen Fehlerfällen und deren Auswirkungen • Definition von Sicherheitsanforderungen	• Analyse und Bewertung konstruktiver Lösungen hinsichtlich sicherheitskritischer Fehlerfälle und Zustände • Soll-Ist Abgleich mit definierten Anforderungen	• Analyse von Bauteilen hinsichtlich sicherheitskritischer Fehler und deren Ausfälle • Soll-Ist Abgleich mit definierten Anforderungen	Beispiel eines identifizierten, potenziellen Fehlerfalls und Lösungssatz	Fehlerfall: „Ausfall der Energiezufuhr“ Konstruktive Sicherstellung einer Messtorgangweise im Auslieferungszustand	Fehlerfall: „Toleranzabgleich in Längsrichtung“ Nennposition der Aktork ist ungleich der Nennposition des Aktors	Fehlerfall: „Lösen der Vorspannmutter durch Vibrationen“ Verwendung von Kriechmutter (Formschlüss)
Fokus	Gesamtsystemebene	Baugruppenebene	Bauteilebene											
Ziel des Prozessschritts	• Identifikation von sicherheitskritischen Fehlerfällen und deren Auswirkungen • Definition von Sicherheitsanforderungen	• Analyse und Bewertung konstruktiver Lösungen hinsichtlich sicherheitskritischer Fehlerfälle und Zustände • Soll-Ist Abgleich mit definierten Anforderungen	• Analyse von Bauteilen hinsichtlich sicherheitskritischer Fehler und deren Ausfälle • Soll-Ist Abgleich mit definierten Anforderungen											
Beispiel eines identifizierten, potenziellen Fehlerfalls und Lösungssatz	Fehlerfall: „Ausfall der Energiezufuhr“ Konstruktive Sicherstellung einer Messtorgangweise im Auslieferungszustand	Fehlerfall: „Toleranzabgleich in Längsrichtung“ Nennposition der Aktork ist ungleich der Nennposition des Aktors	Fehlerfall: „Lösen der Vorspannmutter durch Vibrationen“ Verwendung von Kriechmutter (Formschlüss)											
<p>Konstruktion des adaptiven Systems, für das Fehlerfälle und -folgen bekannt sind und die in dieser Hinsicht gezielt für eine Fehlervermeidung und in der Robustheit optimiert wurde.</p> <p>Ergebnis (Ausgangsinformationen und Ergebnisform)</p>		<p>Visualisierung</p> <p>Sicherheitstechnik Verantwortliche Disziplin/Fachbereich</p>												
<p>zunehmender Reifegrad der Lösungskonzepte</p> <p>Benötigte Vorarbeit/Eingangsinformationen</p>		<p>Konzept- bis Ausarbeitungsphase</p> <p>Phase/Arbeitsabschnitt</p>												
<p>Projektbegleitende Abstimmung der konstruktiven Lösungen mit den Disziplinen Architektur, Tragwerksplanung und Maschinenbau</p> <p>Erforderliche Ressourcen, z. B. weiteres (Fach-)Personal, Software etc.</p>		<p>mittel</p> <p>Zeitlicher Aufwand</p>												
<p>Hinweise/Sonstiges (z. B. erforderliche Annahmen)</p>		<p>Kapitel 8.3.4</p> <p>Literaturverweis</p>												

Multidisziplinäre Bewertung adaptiver Tragwerkskonzepte Bezeichnung der Methode		SFB 1244 Methodenbaukasten
Bewertungsmethode Methodentyp	Honold, A01, IKTD Name, Teilprojekt, Institut	
Bewertung zuvor erarbeiteter Tragwerkskonzepte des zu planenden Gebäudes anhand von qualitativen und quantitativen Kriterien. Die Kriterien umfassen Bewertungsaspekte aus den an der Planung bzw. dem Entwurf beteiligten Disziplinen und sind von jeweiligen Vertretern hinsichtlich der Erfüllung bei den Konzepten zu analysieren. Die Bewertung bezweckt eine Vergleichbarkeit der Konzepte auf unterschiedlichem Abstraktionsgrad. Methodenbeschreibung (Zweck und Funktion)		
Gegenüberstellung verschiedener (adaptiver) Tragwerkslösungen für das zu realisierende Gebäude zur Identifikation von jeweiligen vor- und nachteilhaften Ausprägungen als Grundlage einer nachfolgenden Konzeptauswahl. Ergebnis (Ausgangsinformationen und Ergebnisform)		Visualisierung Projektmanagement, Sonstige Verantwortliche Disziplin/Fachbereich
adaptive Tragwerkslösungen im Konzeptstadium Benötigte Vorarbeit/Eingangsinformationen		Konzeptphase Phase/Arbeitsabschnitt
alle Stakeholder und Vertreter aus den beteiligten Fachdisziplinen Erforderliche Ressourcen, z. B. weiteres (Fach-)Personal, Software etc.		mittel Zeitlicher Aufwand
Konzeptauswahl kann beispielsweise mit Auswahlliste erfolgen Hinweise/Sonstiges (z. B. erforderliche Annahmen)		Kapitel 8.5 Literaturverweis

Requirements Engineering Bezeichnung der Methode		SFB 1244 Methodenbaukasten
Analysemethode bzw. Soll-/Ist-Abgleich Methodentyp	Honold, A01, IKTD Name, Teilprojekt, Institut	
Ziel des Requirements Engineerings (RE) ist in diesem Kontext das Erlangen und Pflegen eines gemeinsamen Verständnisses über das zu planende bzw. entwickelnde adaptive System innerhalb des interdisziplinären Planungsteams. Das RE gliedert sich in die Phasen Aufgabenklärung (Erheben, Analysieren sowie Dokumentieren von Anforderungen) sowie das Anforderungsmanagement (Freigeben, Versionieren, Ändern und Rückverfolgen von Anforderungen). Methodenbeschreibung (Zweck und Funktion)		Anforderungsspezifikation
Anforderungsspezifikation (z. B. in Form einer Bedarfs-/Anforderungsliste), die sämtliche an das Ergebnis gestellten Anforderungen beinhaltet, fortwährend aktualisiert wird und allen Planungsbeteiligten vorliegt. Ergebnis (Ausgangsinformationen und Ergebnisform)		z. B. Anforderungsliste Visualisierung Projektmanagement Verantwortliche Disziplin/Fachbereich
Aufgabenstellung bzw. Projektziele, weitere Randbedingungen Benötigte Vorarbeit/Eingangsinformationen		Bedarfserhebung bis Realisierung Phase/Arbeitsabschnitt
Alle Stakeholder und Vertreter aus den beteiligten Fachdisziplinen Erforderliche Ressourcen, z. B. weiteres (Fach-)Personal, Software etc.		hoch (100 bis 150 h) Zeitlicher Aufwand
RE kann datenbankgestützt angewandt werden Hinweise/Sonstiges (z. B. erforderliche Annahmen)		[Honold et al. 2017] Literaturverweis

A.11 Darstellungs- und Auswahlkonzepte für Methodenbaukästen

Konzeptvisualisierung			Eigenschaften																																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Problemanalyse</th> <th>Lösungssuche</th> <th>Bewertung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Qualitativ</td> <td>Intuitiv</td> <td>Punktbewertung</td> </tr> <tr> <td>• Anforderungsdefinition, T ● • ...</td> <td>• Brainstorming, T • Galeriemethode, T • ...</td> <td>• Konzeptbewert., T • Portfolio, T ● • ...</td> </tr> <tr> <td>Quantitativ</td> <td>Diskursiv</td> <td>Kennzahl</td> </tr> <tr> <td>• Portfolio, T ● • Paretoanalyse • ...</td> <td>• Reverse engineering, ● • Ordnungsschema</td> <td>• Target costing, T ● • Amortisationsrechnung</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td>...</td> <td>...</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td>...</td> <td>...</td> </tr> </tbody> </table>	Problemanalyse	Lösungssuche	Bewertung	Qualitativ	Intuitiv	Punktbewertung	• Anforderungsdefinition, T ● • ...	• Brainstorming, T • Galeriemethode, T • ...	• Konzeptbewert., T • Portfolio, T ● • ...	Quantitativ	Diskursiv	Kennzahl	• Portfolio, T ● • Paretoanalyse • ...	• Reverse engineering, ● • Ordnungsschema	• Target costing, T ● • Amortisationsrechnung	<p>Legende: T Teamwork empfohlen ● Zeitaufwand gegeben</p>	<p>Methodentabelle</p> <ul style="list-style-type: none"> • tabellarische Darstellung, z. B. mit Hauptkategorien (z. B. Zweck der Methode) in Spalten und mehreren Unterkategorien in Zeilen • Auswahl durch Eingrenzung der Methoden mit Hilfe der angegebenen Kriterien • weitere Auswahlkriterien können als Symbole hinter den Namen der Methoden angegeben werden (z. B. steht T für „Teamarbeit empfohlen“ und ● weist auf einen typischerweise und vergleichsweise hohen Zeitaufwand im Fall einer Anwendung hin) 																																																
Problemanalyse	Lösungssuche	Bewertung																																																																					
Qualitativ	Intuitiv	Punktbewertung																																																																					
• Anforderungsdefinition, T ● • ...	• Brainstorming, T • Galeriemethode, T • ...	• Konzeptbewert., T • Portfolio, T ● • ...																																																																					
Quantitativ	Diskursiv	Kennzahl																																																																					
• Portfolio, T ● • Paretoanalyse • ...	• Reverse engineering, ● • Ordnungsschema	• Target costing, T ● • Amortisationsrechnung																																																																					
...																																																																					
...																																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Methode</th> <th>Problemanalyse</th> <th>Lösungssuche</th> <th>Bewertung</th> <th>Qualitativ</th> <th>Quantitativ</th> <th>Intuitiv</th> <th>Diskursiv</th> <th>Teamwork empfohlen</th> <th>Zeitaufwand gegeben</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Amortisationsrechnung</td> <td></td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td>•</td> </tr> <tr> <td>Brainstorming</td> <td>•</td> <td>•</td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td>•</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Konzeptbewertung</td> <td></td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>•</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Galeriemethode</td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td>•</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ordnungsschema</td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td></td> <td>•</td> <td></td> <td>•</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Methode	Problemanalyse	Lösungssuche	Bewertung	Qualitativ	Quantitativ	Intuitiv	Diskursiv	Teamwork empfohlen	Zeitaufwand gegeben	Amortisationsrechnung			•		•		•		•	Brainstorming	•	•		•		•		•		Konzeptbewertung			•					•		Galeriemethode		•		•		•		•		Ordnungsschema		•		•			•		•	...										<p>Methodenmatrix</p> <ul style="list-style-type: none"> • einfache Zuordnung von Methoden (z. B. in Zeilen) zu verschiedenen Kriterien bzw. Hauptkategorien (in Spalten) • Auswahl erfolgt gemäß einer Auswahlliste nach der Bestimmung der für den Anwendungsfall relevanten Kriterien • prinzipielle Erweiterbarkeit der Matrix mit beliebig vielen Kriterien möglich <p><i>Darstellung angelehnt an VDI 2221 [VDI 2221 1993, S. 33 ff.]</i></p>
Methode	Problemanalyse	Lösungssuche	Bewertung	Qualitativ	Quantitativ	Intuitiv	Diskursiv	Teamwork empfohlen	Zeitaufwand gegeben																																																														
Amortisationsrechnung			•		•		•		•																																																														
Brainstorming	•	•		•		•		•																																																															
Konzeptbewertung			•					•																																																															
Galeriemethode		•		•		•		•																																																															
Ordnungsschema		•		•			•		•																																																														
...																																																																							
	<p>Methodenlandkarte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zuordnung der Methoden zu Pfaden, die klassifizierende Kategorien darstellen (z. B. Zweck der Methode wie "Problemanalyse"), und sich für Unterkategorien verzweigen (z. B. qualitative oder quantitative Ergebnisse) • weitere Kriterien können mit Symbolen angegeben werden (vgl. Methodentabelle). • Auswahl von Methoden erfolgt durch Folgen der Pfade und Berücksichtigen der zugehörigen Kriterien und Symbole <p><i>Honold et al. [HONOLD19B] entwickelten eine detaillierte Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden.</i></p>																																																																						
	<p>Methodendiagramm</p> <ul style="list-style-type: none"> • direkte Integration von Methoden in die Darstellung eines generischen Prozesses • wiederkehrender (generischer) Prozessablauf mit Schritten als Grundlage erforderlich • Anwendung für die Darstellung vorausgewählter Methoden • übersichtliche Darstellung von Empfehlungen für den Zeitpunkt der Anwendung • (allgemein anwendbare) Methoden, die sich nicht einem Prozessschritt zuordnen lassen, sind alternativ darzustellen <p><i>Darstellung in Anlehnung an VDI 2221 [VDI 2221 1993, S. 9]</i></p>																																																																						

Projektstart	Meilenstein 1			Meilenstein 2				Zeit
	Anforderungsdefinition, T	Target costing, T	Spezifikation	Galeriemethode, T	Ordnungsschema	Konzeptbew., T	Produktkonzepte	
Legende: x = zu bearbeiten ■ = zu prüfen - = in Bearbeitung ■ = abgeschlossen			x					...
System	■	■	■				x	
Modul A.1			■		■			x
Modul A.2			■	■			-	
Bauteil A.2.1				■			-	
Bauteil A.2.1				■		x		
Modul B.1			-		-		x	
...								

Methoden-Anwendungszeitplan

- tabellarisches Format, in dem die Spalten definierte Entwicklungsstadien (Quality Gates) darstellen
- Darstellung enthält Vorschläge für Methodenanwendungen und ggf. Zwischenergebnisse oder Meilensteine
- Entwicklungskomponenten (Systeme, Module oder Bauteile) sind in Zeilen aufgelistet
- Zeilen weisen auf vorgesehene Methodenanwendungen und den jeweiligen Bearbeitungsstand hin
- Grundlage bildet ein (generisches) wiederkehrendes Vorgehen und für den Anwendungsfall eine individuelle Vorauswahl von Methoden

vgl. Darstellung mit [IT-PRODUCTION14]

Tabelle A.1: Darstellungs- und Auswahlkonzepte für Methodenbaukästen in Anlehnung an [HONOLD19C, S. 173 f.]

A.12 Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden

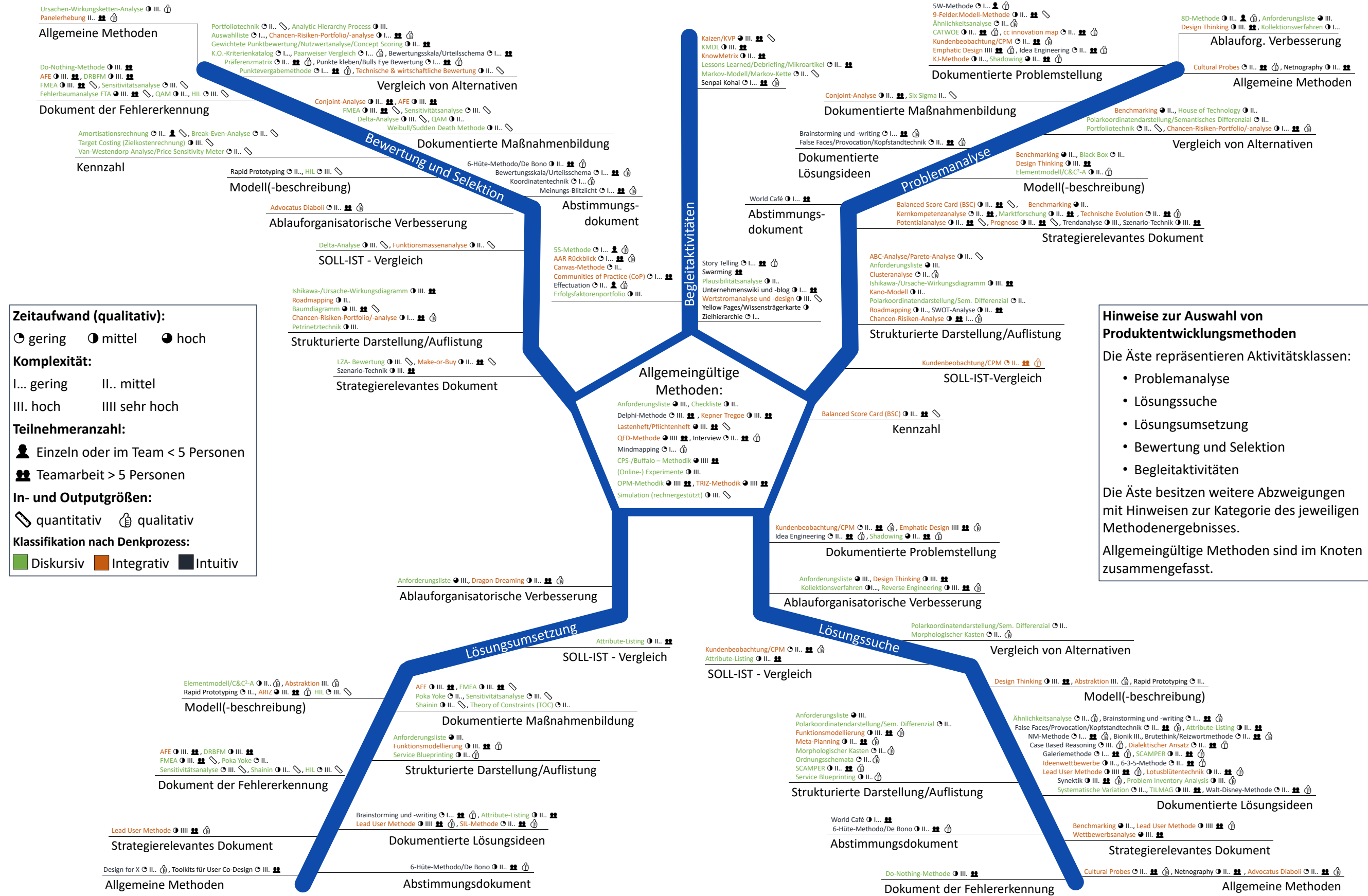


Bild A.9: Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden, nach Fischer [FISCHER18] bzw. Honold et al. [HONOLD19B, S. 8]

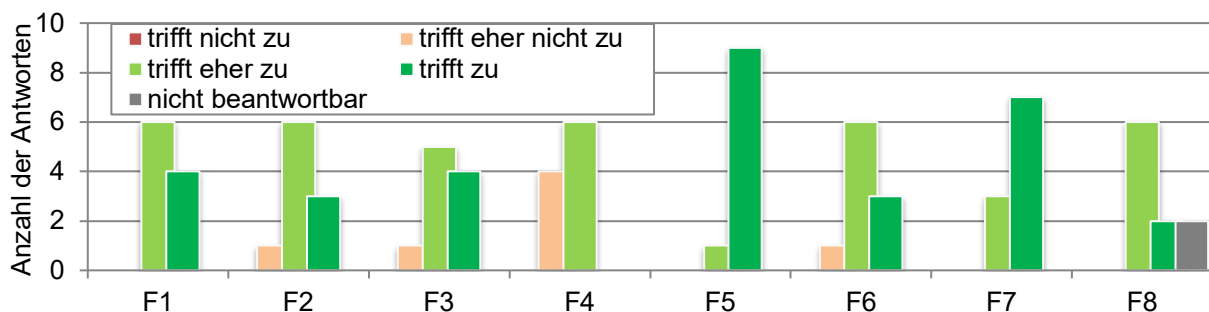
A.13 Informationsflüsse bei der Anwendung der Methodik zur Reduktion von Umweltwirkungen bei der Planung adaptiver Gebäude



Bild A.10: Informationsflüsse bei Anwendung der Methodik nach Schlegl et al. [SCHLEGL19A, S. 11]

A.14 Evaluationsergebnisse zur Methodenlandkarte für Produktentwicklungsmethoden

Zur Evaluation der Methodenlandkarte wurden zehn Probanden zwei Aufgaben gestellt, die mit Hilfe der Methodenlandkarte oder vorhandener Erfahrung zu beantworten waren. Die Probanden setzen sich aus sechs Produktentwicklern mit industrieller Praxiserfahrung bzw. wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts sowie vier Studierenden höherer Semester mit der fachlichen Spezialisierung im Bereich der methodischen Produktentwicklung zusammen. Bild A.11 beinhaltet die bzgl. des Grads der Zustimmung zu bewertenden Aussagen und die Verteilung der Antworthäufigkeiten. Eine vollständige Erläuterung dieser Evaluation fassen Honold et al. [HONOLD19B, S. 7 f.] zusammen.



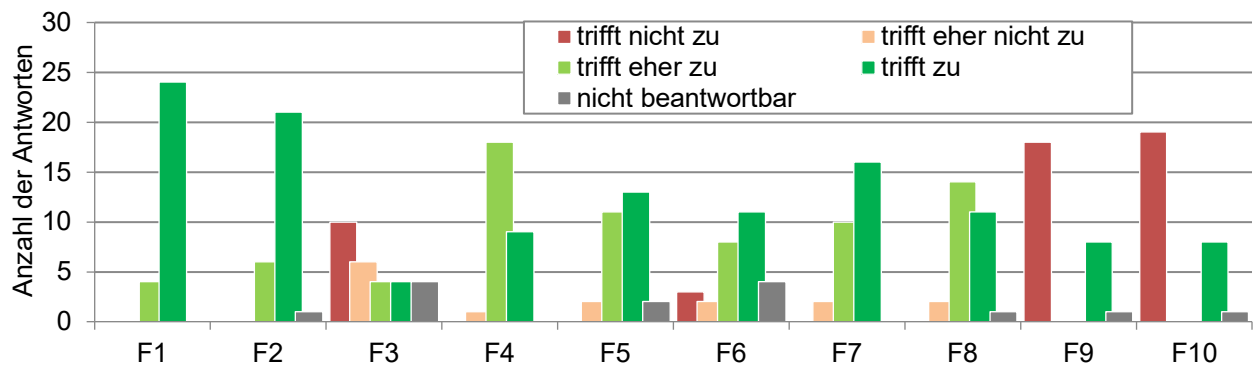
- F1: Die Methodenlandkarte unterstützt bei der problemspezifischen Auswahl von Methoden (Aufgabe 1).
 F2: Die Methodenlandkarte unterstützt bei der Planung eines Entwicklungsprojekts (Aufgabe 2).
 F3: Sie nutzen die Methodenlandkarte auch zukünftig, wenn Ihnen diese zur Verfügung steht.
 F4: Sie haben mithilfe der Methodenlandkarte bei der Bearbeitung der beiden Aufgaben Methoden vorgeschlagen, die Sie intuitiv nicht vorgeschlagen hätten.
 F5: Die Methodenlandkarte stellt anschaulich die Vielzahl und Vielseitigkeit von Produktentwicklungsmethoden dar.
 F6: Die Methodenlandkarte ist anwendungsfreundlich gestaltet.
 F7: Die Methodenlandkarte umfasst zahlreiche Methoden.
 F8: Die Methodenlandkarte umfasst nahezu alle etablierten Methoden der Produktentwicklung.

Bild A.11: Evaluationsergebnisse der Methodenlandkarte: Fragestellungen und Antwortverteilung nach Honold et al. [HONOLD19B, S. 7 f.]

A.15 Evaluationsergebnisse „Webbasierte Anforderungslisten“

Die Evaluation der Webapp erfolgte im Rahmen einer studentischen Projektarbeit von 26 Studierenden mit Beteiligung von zwei Industrievertretern sowie sieben wissenschaftlichen Mitarbeitern. In der Projektarbeit war im Rahmen der Konzeption eines neuartigen Produkts eine Anforderungsliste mit dem Tool zu erstellen bzw. zu pflegen. Bild A.11 beinhaltet die im Nachgang bzgl. des Grads der Zustimmung zu bewertenden Aussagen und die Verteilung der Antworthäufigkeiten.

Im Durchschnitt gaben die Beteiligten an, jeweils 55 Anforderungen erstellt oder bearbeitet und dabei jeweils 17 Stunden mit dem Tool gearbeitet zu haben. Der bevorzugte Zugriff erfolgte mittels Computer.



Aussagen zur Anwendung:

F1: Das Tool unterstützt Sie beim Dokumentieren, d. h. dem strukturierten schriftlichen Festhalten von Anforderungen.

Kommentare: „einfache Bedienung; übersichtlich und handlich; vorgegebene Form (spart Zeit); leichtes Eintragen; strukturierter Aufbau; gemeinsamer, gleichzeitiger Zugriff; immer aktualisiert; einfach und selbsterklärend; erfüllt den Zweck einer Online-Anforderungsliste“

F2: Bei der Erstellung einer Anforderungsliste im Team bietet das Tool Vorteile im Vergleich zu einem gemeinsam erstellten Dokument (z. B. Excel-Tabelle, Word-Dokument, ...).

Kommentare: „kein manuelles Versionieren; Änderungsmodus; gleichzeitiger Zugriff bei Bearbeitung; direkte Synchronisierung, somit keine veraltete Versionen (wie bei Dokumenten); keine Layout-Probleme; Kompatibilität auf allen Geräten; kein Bedarf von Cloud-Diensten“

F3: Bei der Erstellung einer Anforderungsliste im Team bietet das Tool Nachteile im Vergleich zu einem gemeinsam erstellten Dokument (z. B. Excel-Tabelle, Word-Dokument, ...).

Kommentare: „Internetzugang und Online-Anmeldung notwendig; Office-Dokument ist flexibler bzw. erweiterbar (z. B. Bilder); Einschränkung bei Zeichensetzung und Exportfunktion“

F4: Das Tool lässt sich intuitiv anwenden.

Kommentare: „gute Übersichtlichkeit; eindeutige Icons; nicht alle Funktionen intuitiv auffindbar; Aufbau selbsterklärend; nach Erstellen der 1. Anforderung sehr gut; keine längere Einarbeitung nötig“

F5: Das Tool hat das Dokumentieren und Pflegen (Freigeben, Versionieren, Ändern, Rückverfolgen) von Anforderungen erleichtert.

Kommentare: „Anzeige von Änderungen hilfreich, da ersichtlich, wer Änderungen vornahm; Übersichtlichkeit nach Themen geordnet; Zugriff aller Beteiligten war um einiges einfacher als bei anderen Programmen; kurzfristige Änderungen ließen sich schnell für alle beteiligten Personen festhalten“

F6: Durch die Nutzung des Tools für das Dokumentieren und Pflegen haben Sie im Vergleich zu einem gemeinsam erstellten Dokument (z. B. Excel-Tabelle) Zeit während der Entwicklung eingespart.

Kommentare: „gleichzeitiger Zugriff; Änderungen sofort verfügbar; Erstellen einer Excel-Vorlage entfällt; automatisiertes Eintragen von Name und Datum; keine weiteren Dokumente notwendig; Zeitvorteil durch Fehler ausgeglichen; Einpflegen dauert etwas länger“

F7: Sie würden das Tool auch zukünftig nutzen, wenn Ihnen dieses zur Verfügung steht.

Kommentare: „habe gute Erfahrungen gemacht; noch zu viele Fehler; wird immer wieder Situationen geben, in denen das Tool perfekt genutzt werden könnte; kenne keine vergleichbaren Programme“

Aussagen zum Funktionsumfang:

F8: Das Tool umfasst bereits alle wesentlichen Funktionen für die Erstellung und Pflege von Anforderungslisten in kleinen Entwicklungsteams (< 10 Personen).

Kommentare: „siehe F9; für unsere Anwendung voll ausreichend; gutes und einfaches Programm“

F9: Für eine Nutzung in kleinen Entwicklungsteams fehlen noch wesentliche Funktionen.

Kommentare: „Sonderzeichen; Export (in Excel); Verwaltungszugriff für jeden; Upload von Bildern; Zuordnung der Verantwortlichkeiten“

Sonstiges:

F10: Während der Anwendung des Tools traten Systemfehler auf.

Kommentare: „Zoomen; Darstellung auf Handy eingeschränkt; Umbenennen der Hauptmerkmale“

F11: Haben Sie weitere Verbesserungsvorschläge zum Tool?

Kommentare: „weitere Funktionen zur Gliederung der Anforderungen; siehe F9 und F10“

Im Durchschnitt gaben die Anwender an, jeweils 55 Anforderungen erstellt oder bearbeitet und dabei jeweils 17 Stunden mit dem Tool gearbeitet zu haben. Der bevorzugte Zugriff erfolgte mittels Computer.

Bild A.12: Evaluationsergebnisse der Webapp: Fragestellungen und Antwortverteilung

A.16 Potenzialkriterien für adaptive Tragwerke

Im Vergleich zu konventionellen Tragwerken können adaptive Tragwerkssysteme ein Potenzial zur Reduktion von Umweltwirkungen aufweisen, wenn für die jeweils gegebenen Randbedingungen der Planungsaufgabe zumindest eines der nachfolgend gelisteten Kriterien zutrifft:

- Im Verhältnis zur statischen Beanspruchung treten nennenswerte veränderliche Lasten durch äußere Einwirkungen auf.
Beispiel: Winde oder Erdbeben bei Hochhäusern
- Das Tragwerk zeigt aufgrund von dessen schlanken Bauform eine besondere Anfälligkeit zum Schwingen.
Beispiel: Wolkenkratzer, (Fernseh-)Türme, Schornsteine
- Im Verhältnis zur Eigenlast treten nennenswerte veränderliche Nutzlasten auf.
Beispiel: Zyklische Nutzung von Stellplätzen in Parkhäusern
- Für das Tragwerk bestehen hohe Anforderungen an eine geringe Verschiebung bei Belastungen. Beispiel: Brücken für Hochgeschwindigkeitszüge während einer Überfahrt
- Starke Temperaturschwankungen führen zu ungewünschten Verschiebungen innerhalb der Tragstruktur.
Beispiel: Brücken mit großer Spannweite

Die Kriterien wurden während der interdisziplinären Forschungsarbeit des SFB 1244 identifiziert und sind mit zukünftigen Erkenntnissen fortzuschreiben.