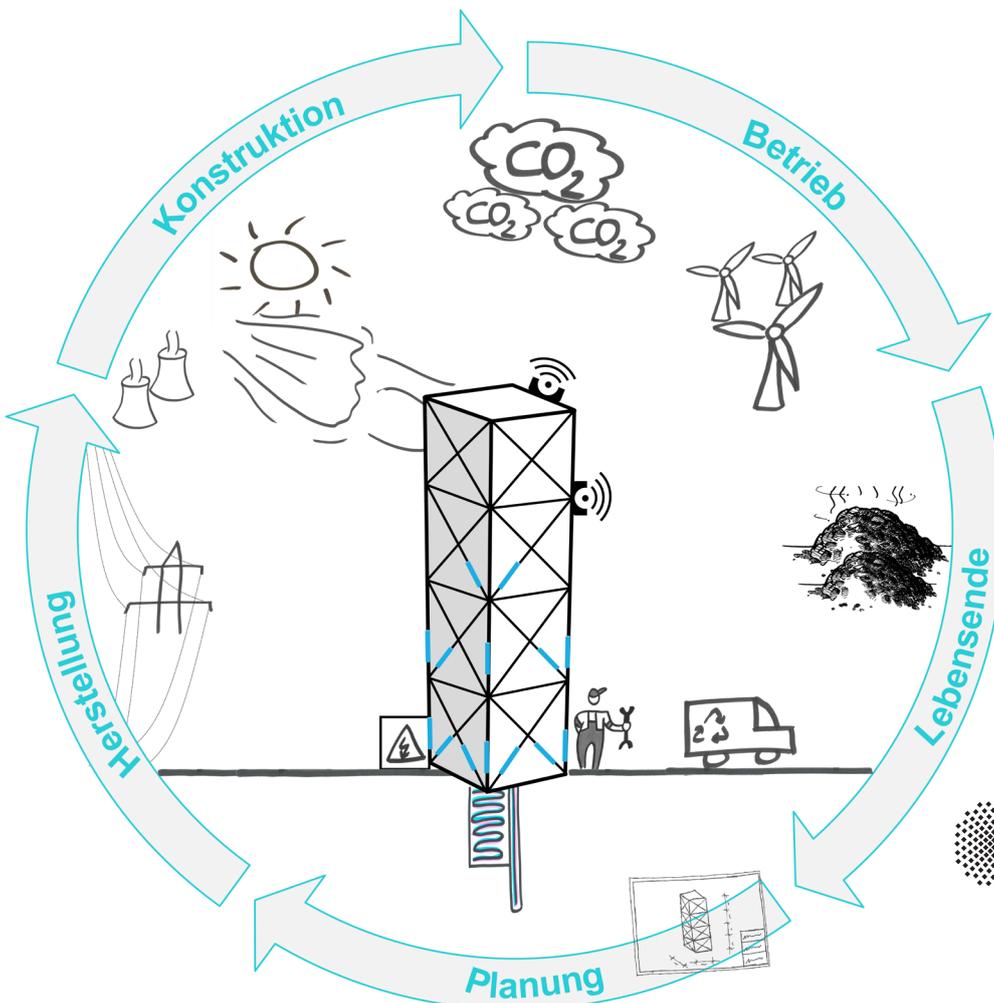


Friederike van den Adel

Integration von Umweltaspekten in den Planungsprozess adaptiver Gebäude

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK

BAND 44



Universität Stuttgart
Institut für Akustik
und Bauphysik



Technische Universität München
Lehrstuhl für Bauphysik

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK

BAND 44

Herausgeber: Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer
Prof. Dr. Philip Leistner
Prof. Dr. Schew-Ram Mehra

Friederike van den Adel

**Integration von Umweltaspekten in den
Planungsprozess adaptiver Gebäude**

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-00
info@ibp.fraunhofer.de
www.ibp.fraunhofer.de

Titelbild: © Friederike van den Adel

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

ISSN: 1869-5124

ISBN: 978-3-8396-1727-4

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Druck und Weiterverarbeitung:
Fraunhofer Verlag, Mediendienstleistungen

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2021

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
verlag@fraunhofer.de
www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e.V.
Hansastraße 27 c
80686 München
www.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Integration von Umweltaspekten in den Planungsprozess adaptiver Gebäude

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
vorgelegte Abhandlung

vorgelegt von
Friederike van den Adel
aus Reutlingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer

Tag der mündlichen Prüfung:
11.02.2021

Institut für Akustik und Bauphysik
Universität Stuttgart
2021

Danksagung

Diese Arbeit entstand in den Jahren 2017 bis 2020 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung am Institut für Akustik und Bauphysik der Universität Stuttgart.

Ein herzlicher Dank geht an Herrn Leistner, der mich auf faire, kreative und unkomplizierte Weise in der Promotion unterstützt hat. Vielen Dank Herrn Sedlbauer, der sehr offen und selbstverständlich als Mitberichter gewirkt hat. Danke auch an Herrn Zillig für das ehrliche Feedback.

Meinen Kolleg*innen der Abteilung GaBi danke ich für die fantastische Gemeinschaft und die allgemeine konstante Unterstützung für die Dissertation. Katrin, Stefan, Matthias, Johannes und Roberta D.B. gilt mein Dank, dass sie mich entlang meines Promotionsweges tatkräftig durch Diskussionen, Expert*innenrunden und Feedback unterstützt haben. Stefan, ich danke dir außerdem für deine Kreativität, dein Vertrauen, dass du mir meine benötigte Arbeitszeit ermöglicht hast und dass du ein kritikfähiger und offener Gruppenleiter, Zimmergenosse und Kollege für mich warst!

Danke an die „Jungen und Wilden“ der Abteilung, die mir die Hoffnung geben, dass die Menschheit vielleicht doch um ihr Überleben und nicht nur ihren Reichtum kämpfen wird. Ein besonderer Dank hierbei an Ann-Ki für einige Zeichnungen in dieser Arbeit, die moralische Unterstützung, die tollen Gespräche und gemeinsamen Auszeiten. Nadine, danke für unser herzliches Miteinander, die Diskussionen und Gespräche zu allen Themen rund um die Adaptivität.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Eltern, die es mir ermöglicht haben, ohne Sorgen zu studieren. Durch eure Geborgenheit habt ihr mir einen Ort der Erholung und Ruhe geschaffen. Außerdem danke ich meinen Geschwistern, die mir je auf ihre ganz besondere Art und Weise als Vorbilder und Lebensgefährt*innen zur Seite stehen. Petra und Norbert danke ich für die langjährige vielgestaltige Unterstützung, die mir mein Leben erleichtern und bereichern. Danke Dir Bent: Du hast stets ein offenes Ohr für meine Sorgen, Nöte, Entdeckungen und Entwicklungen. Danke, dass es Dich gibt und ich meine Energiereserven immer wieder bei dir aufladen kann.

Friederike van den Adel

Stuttgart, im November 2020

„We can not make ‘deals’ with physics. “

Greta Thunberg

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	7
Kurzfassung.....	9
Abstract.....	11
Tabellenverzeichnis.....	14
Abbildungsverzeichnis.....	16
Glossar.....	19
1 Einführung.....	21
1.1 Motivation und Ziel.....	22
1.2 Aufbau der Arbeit.....	25
2 Stand des Wissens.....	27
2.1 Grundlagen.....	27
2.1.1 Adaptivität im Bauwesen.....	27
2.1.2 Planungsphasen von Gebäuden.....	36
2.1.3 Umweltaspekte.....	40
2.1.4 Komplexe Systeme.....	45
2.2 Stand der Forschung.....	50
2.2.1 Umweltaspekte in Planungsphasen von Gebäuden.....	51
2.2.2 Umweltaspekte in Planungsphasen von adaptiven Gebäuden.....	54
2.2.3 Anwendung der Systemtheorie im Bauwesen.....	55
2.3 Analyse des Stands des Wissens.....	56
3 Methodikentwicklung.....	60
3.1 Anforderungen an die Methodik.....	60
3.1.1 Methodische Anforderungen.....	60
3.1.2 Praktische Anforderungen.....	61

3.2	Vorgehensweise der Methodikentwicklung	62
4	Systemuntersuchung	64
4.1	Vorgehensweise der Systemuntersuchung	64
4.2	Festlegung des Untersuchungsrahmens	65
4.3	Erfassung der Einflussfaktoren	67
4.4	Durchführung und Beschreibung der Wechselwirkungsanalyse	70
4.5	Interpretation der Wechselwirkungsanalyse	74
4.6	Zwischenfazit der Systemuntersuchung	77
5	Methodik zur Abschätzung von lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen im Planungsprozess adaptiver Gebäude (ActUate)	84
5.1	Struktur der Methodik ActUate	84
5.2	Zeitliche Einordnung	85
5.3	Ziel und Untersuchungsrahmen	88
5.4	Dateninput und Sachbilanz	93
5.5	Wirkungsabschätzung und Auswertung	99
5.6	Direkte Anwendung	101
5.7	Zusammenfassung und Fazit der Methodik	102
6	Anwendung der Methodik	106
6.1	Beispiel 1: Adaptives Tragwerk	106
6.1.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	106
6.1.2	Dateninput und Sachbilanz	107
6.1.3	Wirkungsabschätzung und Auswertung	110
6.1.4	Direkte Anwendung	112
6.2	Beispiel 2: Adaptive Fassade	112
6.2.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	112
6.2.2	Dateninput und Sachbilanz	114
6.2.3	Wirkungsabschätzung und Auswertung	117

6.2.4 Direkte Anwendung.....	118
7 Evaluation.....	121
7.1 Überprüfung der Anforderungen.....	121
7.1.1 Methodische Anforderungen.....	121
7.1.2 Praktische Anforderungen.....	122
7.2 Möglichkeiten und Grenzen	124
8 Zusammenfassung	126
9 Ausblick.....	130
Literaturverzeichnis.....	132
Anhang.....	145
Anhang A: Einflussfaktorenkatalog	145
Anhang B: Einflussmatrix.....	152
Lebenslauf.....	170
Eidesstattliche Erklärung.....	171

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

ActUate	Methodik zur Abschätzung von lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen im Planungsprozess adaptiver Gebäude
BIM	Building Information Modeling
BIM2LCA4IP	Projektkronym des Forschungsprojekts „BIM-basierte integrale Planung“
BKI	Baukosteninformationszentrum
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
CNT	Kohlenstoffnanoröhren (engl. carbon nanotubes)
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
EeBGuide	Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy Efficient Buildings Initiative
EF	Einflussfaktoren
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPD	Umweltproduktdeklarationen (engl. Environmental Product Declaration)
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung
GWP	Treibhauspotential (engl. Global Warming Potential)
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
IPD	Integrated Project Delivery
LCA	Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment)
MET	Materialflüsse, Energieverbräuche und toxische Emissionen
MIPS	Material-Input pro Serviceeinheit
PCM	Phasenwechselmaterialien (engl. Phase Change Material)
PE _{ne}	Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen
PMV	Vorhergesagtes mittleres Votum (engl. Predicted Mean Vote)

PPD	Vorhersagender Prozentsatz Unzufriedener (engl. Predicted Percentage of Dissatisfied)
PVDF	Polyvinylidendifluorid
P-LCA	Wahrscheinlichkeitsbasierte dynamische LCA (engl. Probabilistic LCA)
SFB	Sonderforschungsbereich
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
UW	Umweltwirkung
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
VTT	Technisches Forschungszentrum Finnland

Formelzeichen und Einheiten

%	Prozent
a	Jahr
Äq.	Äquivalente
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
h	Stunde
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWh/a	Kilowattstunde pro Jahr
K	Kelvin
l	Liter
m	Meter
MJ	Megajoule
mm	Millimeter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
W	Watt

Kurzfassung

Hitze, Dürren, Starkregen und Stürme – die intensive Ressourcenausbeutung und der übermäßige Ausstoß von Treibhausgasen wirken sich schädlich auf den Lebensraum Erde aus. Fast 40% des gesamten anthropogenen Beitrags zum Klimawandel entsteht durch den enormen Ressourcenverbrauch im Bauwesen [79]. Bei einem Blick auf die weiter rasant ansteigende Weltbevölkerung lassen sich die aktuell eingesetzten Materialien zukünftig nicht mehr in diesem Ausmaß in Gebäuden verbauen [119].

Im konventionellen Gebäudebau werden dynamische Einwirkungen aus dem Umfeld, wie Wind oder Nutzlast, durch statische Masse kontrolliert. Eine Möglichkeit, den Ressourceneinsatz und die schädlichen Umweltwirkungen im Bauwesen zu reduzieren, ist die Integration adaptiver Systeme in die Gebäude (adaptive Gebäude). Adaptive Systeme lassen Gebäudekomponenten bei auftretenden dynamischen Einwirkungen gezielt anpassen. Im Gegensatz zu konventionellen Gebäuden reagieren adaptive Gebäude durch ihre Anpassungsfähigkeit flexibel auf die Veränderungen in der Umgebung, wodurch auf statische Masse verzichtet werden kann, jedoch zusätzlicher Energiebedarf notwendig wird.

Im Planungsprozess adaptiver Gebäude sind im Vergleich zu konventionellen Gebäuden neue Aspekte wie die dynamische Bauteilauslegung, mitzubeachten. Fachdisziplinen wie die Statik oder Systemdynamik erhalten veränderte und zusätzliche Aufgaben. Dadurch entsteht ein neuartiger, komplexer und interdisziplinärer Planungsprozess für adaptive Gebäude. Die Datenverfügbarkeit im Planungsprozess wird sich daher in Bezug auf die Erfassung von Umweltaspekten drastisch verändern. Umweltaspekte auf der Grundlage vorhandener Planungsinformationen frühzeitig zu integrieren, stellt eine zusätzliche Herausforderung dar.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird in dieser Arbeit die Methodik zur Abschätzung von lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen im Planungsprozess adaptiver Gebäude (ActUate) entwickelt. ActUate dient dazu, Gebäudeentwürfe und -konzepte hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen abzuschätzen, um fallspezifisch geeignete adaptive Systeme für Gebäude konzipieren zu können. Somit entsteht eine Grundlage, die schädlichen Umweltwirkungen weitmöglichst zu reduzieren.

Um sicherzustellen, dass in ActUate die wichtigen Zusammenhänge adaptiver Gebäude in Bezug auf deren Umweltaspekte berücksichtigt werden, wird zu Beginn der Methodenentwicklung eine Systemuntersuchung durchgeführt. Hierbei werden 19

Einflussfaktoren identifiziert und anschließend auf ihre Wechselwirkungen untereinander untersucht und ausgewertet. Die Ableitung resultierender Handlungsempfehlungen ermöglicht unter anderem, die Einflussfaktoren in den Planungsprozess definiert zu integrieren, wodurch unvorhergesehene und ungewünschte Änderungen im Laufe des Planungsprozesses vermieden werden.

ActUate besteht aus fünf Schritten und baut auf den Inhalten und der Vorgehensweise einer klassischen Ökobilanzierung auf. Während die Schritte zwei bis fünf denen der Ökobilanz entsprechen, kommt der erste Schritt neu hinzu. Im ersten Schritt findet die zeitliche Einordnung in den Planungsprozess adaptiver Gebäude statt. Im zweiten Schritt wird das Ziel der Abschätzung formuliert und ferner durch die Wahl einer Systemebene definiert, auf welcher Detaillierungsebene die Abschätzung durchgeführt werden soll. Dadurch lassen sich die Ergebnisse mit anderen Abschätzungen in ActUate vergleichen und übertragen. Die relevanten Daten werden im dritten Schritt unter Berücksichtigung der dynamischen Endenergieverbräuche erfasst und eine Sachbilanz erstellt. Inhalt des vierten Schrittes ist die Wirkungsabschätzung und die Auswertung des Untersuchungsgegenstandes. Im letzten Schritt werden die Ergebnisse mit dem Planungsteam diskutiert und Entwicklungspotentiale aufgezeigt.

Die praktische Anwendbarkeit von ActUate wird in dieser Arbeit am Beispiel eines adaptiven Hörsaaltragwerks und einer adaptiven Membranfassade demonstriert. Die Beispiele zeigen, dass für eine Abschätzung der Umweltwirkungen die benötigte Datenbasis verfügbar ist und dass die neuen Einflussfaktoren, wie zum Beispiel die adaptiven Systeme, sinnvoll zu integrieren und zu modellieren sind. Zudem ermöglicht die direkte Diskussion mit dem Planungsteam auf Grundlage der Abschätzungen Wege aufzuzeigen, wie schädliche Umweltwirkungen reduziert werden können.

Durch ActUate können der Ressourcenverbrauch und die Umweltwirkungen adaptiver Gebäude bereits in deren Planungsprozess effizient und wirkungsvoll abgeschätzt werden. Dadurch lassen sich die neuartigen adaptiven Gebäude bereits vor ihrem Betrieb auf ihre Umweltverträglichkeit testen und schädliche Umweltwirkungen über ihren Lebenszyklus hinweg reduzieren.

Abstract

Heat waves, droughts, heavy rain and storms - the intensive resource exploitation and the excessive emission of greenhouse gases have damaging effects on the planet's habitats. Almost 40% of the total anthropogenic contribution to climate change can be allocated to the enormous resource consumption in the construction industry [79]. Considering the rapidly growing world population, the current material intensive approach in the building sector cannot be perpetuated in the future. [119].

In conventional building construction design, dynamic effects from the surroundings, such as wind forces or load capacity, are balanced by static masses. One way to reduce the resource use and unwanted environmental impacts in the construction industry is to integrate adaptive systems into buildings (adaptive buildings). Adaptive systems enable building components to adapt specifically to dynamic effects. In contrast to conventional buildings, adaptive buildings can react to changes in the surroundings due to their adaptability. Thus static masses can be reduced yet additional control energy is often required.

In the planning process of adaptive buildings, additional aspects, such as dynamic component design, must be taken into account compared to the planning process of conventional buildings. Specialist disciplines of the planning process, such as statics or system dynamics, are facing altered and additional challenges. This results in a novel, more complex and interdisciplinary planning process for adaptive buildings. The availability of data in the planning process is changing dramatically with regards to the assessment of environmental aspects. The need for the integration of environmental aspects on the basis of the existing planning information poses an additional challenge.

In order to address these requirements, this work develop the methodology for the assessment of life cycle related environmental impacts in the planning process of adaptive buildings (ActUate). ActUate can be used to assess building designs and concepts with regard to their environmental impact in order to design suitable adaptive systems for buildings. The developed method creates a basis for reducing unwanted environmental impacts from adaptive buildings as far as possible.

To ensure that all relevant correlations within the system of adaptive buildings are considered in ActUate with regard to their environmental aspects, a systematic investigation was carried out at the beginning of the method development. Therefore

19 influencing factors were identified and afterwards examined and evaluated regarding their interactions with each other. The derived recommendations enable the integration of the influencing factors into the planning process in a defined manner, thus avoiding unforeseen and undesired changes during the planning process.

The ActUate methodology consists of five steps and is based on the approach of a classic life cycle assessment. While steps two to five correspond to those of the life cycle assessment, the first step is new. In the first step, the temporal integration into the planning process of adaptive buildings takes place. In the second step, the goal of the assessment is formulated and, by selecting a system level, the level of detail at which the assessment is to be carried out is defined. This allows the results to be compared and transferred to other assessments in ActUate. In the following third step, relevant data are collected and a life cycle inventory is established. The impact assessment and the evaluation of the investigation object are conducted in step four. In the last step, the results are discussed with the planning team and development potentials are identified.

The practical applicability of ActUate is demonstrated using the examples of an adaptive auditorium structure and an adaptive membrane façade. On the one hand the examples were able to indicate that the available data are suitable regarding its level of detail for an assessment of the environmental impacts. On the other hand the examples show that new influencing factors, such as the adaptive systems, can be integrated into the existing modelling and planning approaches. In addition, the discussions with the planning team on the basis of the preliminary results enables the demonstration of ways of reducing unwanted environmental impacts.

With ActUate, the resource consumption and environmental impacts of adaptive buildings can be efficiently and effectively estimated as early as in the planning process. Thus, new types of adaptive buildings can be tested for their environmental compatibility even before they are in operation and unwanted environmental impacts can be reduced over their life cycle.

Gender-Erklärung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit grammatikalisch die weibliche Form verwendet. Personen des intersexuellen wie auch männlichen Geschlechts sind darin gleichermaßen eingeschlossen. Dies geschieht aus Gründen der Vereinfachung und nicht, um das intersexuelle oder männliche Geschlecht zu diskriminieren.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beurteilung und Gegenüberstellung bestehender Ansätze anhand abgeleiteter Kriterien	57
Tabelle 2: Einflussmatrix adaptiver Gebäude und ihrer Umweltaspekte	72
Tabelle 3: Zwischenfazit der Systemuntersuchung.....	82
Tabelle 4: Definition der Systemebenen in ActUate.....	89
Tabelle 5: Notwendige Datenstruktur für die Benchmark LCA der ersten Phase in ActUate.....	92
Tabelle 6: Fiktive Wirkungsabschätzung und Auswertung in Phase 1 der Methodik ActUate	99
Tabelle 7: Umsetzung der Handlungsempfehlungen A bis H in ActUate	104
Tabelle 8: Dateninput für den adaptiven und konventionellen Hörsaal	108
Tabelle 9: Dateninput für die adaptive und konventionelle Fassade	115
Tabelle 10: Dateninput für die adaptive und konventionelle Fassade in Deutschland, Finnland und Saudi-Arabien	119
Tabelle 11: Zusammenfassung des Schritt 1 bis 3 für die Erarbeitung des Einflussfaktorenkatalogs	145
Tabelle 12: Cluster und Definitionen der Einflussfaktoren	149
Tabelle 13: Ausgefüllte Einflussmatrix einer Ökobilanzexpertin (Autorin) (1)	153
Tabelle 14: Ausgefüllte Einflussmatrix einer Ökobilanzexpertin (2)	154
Tabelle 15: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (3)	155
Tabelle 16: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (4)	156
Tabelle 17: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (5)	157
Tabelle 18: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (6)	158
Tabelle 19: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (7)	159
Tabelle 20: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (8)	160
Tabelle 21: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (9)	161
Tabelle 22: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (10)	162

Tabelle 23: Ausgefüllte Einflussmatrix einer Behaglichkeitsexpertin (11).....	163
Tabelle 24: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Statikexpertinnen (12)	164
Tabelle 25: Ausgefüllte Einflussmatrix einer Bauphysikexpertin (13)	165
Tabelle 26: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Expertinnen aus dem Bereich der adaptiven Gebäudeplanung (14)	166
Tabelle 27: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Kybernetikexpertinnen (15)...	167

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Treibhauspotential (GWP) verschiedener Gebäudevarianten aufgeteilt in Konstruktion und Betrieb	22
Abbildung 2: Möglichkeiten zur Beeinflussung der Umweltwirkungen in den Planungsphasen von Gebäuden	23
Abbildung 3: Aufbau der Arbeit.....	26
Abbildung 4: Funktionsprinzip adaptiver Systeme	28
Abbildung 5: Einwirkungen auf Tragwerke	30
Abbildung 6: Adaptives Tragwerk des Prototypens im Sonderforschungsbereich (SFB) 1244	31
Abbildung 7: Funktionsprinzip von Fluidaktoren in Balken	32
Abbildung 8: Einwirkungen auf Gebäudehüllen	33
Abbildung 9: Planungsprozess für adaptive Tragwerksysteme	39
Abbildung 10: Lebenszyklus von Produktsystemen	41
Abbildung 11: Lebenszyklus von Gebäuden.....	43
Abbildung 12: Funktionsprinzip der Einflussmatrix	48
Abbildung 13: Funktionsprinzip des Systemgrids	49
Abbildung 14: Mögliche Regelkreise in Systemen	49
Abbildung 15: Benchmarks als Instrument für die Integration von Ökobilanzen in Planungsphasen von konventionellen Gebäuden.....	52
Abbildung 16: Vorgehensweise zur Methodikentwicklung	63
Abbildung 17: Vorgehensweise bei der Systemuntersuchung	65
Abbildung 18: Untersuchungsrahmen für die Integration der Umweltaspekte in den Planungsprozess adaptiver Gebäude	66
Abbildung 19: Schritte der Erfassung der Einflussfaktoren (EF).....	67
Abbildung 20: Visualisierung des geclusterten Einflussfaktorenkatalogs	69
Abbildung 21: Systemgrid adaptiver Gebäude und ihrer Umweltaspekte	73

Abbildung 22: Systemdarstellung adaptiver Gebäude und ihrer Umweltaspekte im Planungsprozess	75
Abbildung 23: Ausschnitt aus den Wechselwirkungen in der Betriebsphase adaptiver Gebäude	77
Abbildung 24: Veränderungen und Neuartigkeiten adaptiver Gebäude für die Ökobilanz.....	79
Abbildung 25: Treibhauspotential (GWP) verschiedener Gebäudevarianten aufgeteilt in Konstruktion und Betrieb	80
Abbildung 26: Datenverfügbarkeit bei der Ökobilanz adaptiver Gebäude	81
Abbildung 27: Struktur der Methodik ActUate	85
Abbildung 28: Zeitliche Einordnung der Methodik in den Planungsprozess adaptiver Gebäude	86
Abbildung 29: Systemebenen und Subsystemebenen der Methodik ActUate .	90
Abbildung 30: Dateninput pro Planungsphase der Methodik ActUate.....	94
Abbildung 31: Datenübermittlung des dynamischen Endenergiebedarf von adaptiven Systemen	96
Abbildung 32: Flussdiagramm für den Umgang mit Dateninputs des dynamischen Endenergiebedarfs	97
Abbildung 33: Flussdiagramm für den Umgang mit dem Umweltprofil des Endenergiebedarfs	98
Abbildung 34: Ergebnisdarstellung der Umweltwirkungen adaptiver Gebäude aufgeteilt in Betrieb und Konstruktion	100
Abbildung 35: Break Even Darstellung bei adaptiven Gebäuden	101
Abbildung 36: Zusammenfassender Überblick über die Methodik ActUate ...	103
Abbildung 37: Funktionsprinzip der Fluidaktoren am Beispiel eines Hörsaals.....	107
Abbildung 38: Parameter für die Abschätzung der Umweltwirkungen des adaptiven Hörsaals	109
Abbildung 39: Ergebnisse des Treibhauspotentials (GWP) für den adaptiven und konventionellen Hörsaal	111

Abbildung 40: Ergebnisse des Primärenergiebedarfs aus nicht-erneuerbaren Ressourcen (PE_{ne}) für den adaptiven und konventionellen Hörsaal.....	111
Abbildung 41: Funktionsprinzip der konventionellen und adaptiven Fassade	113
Abbildung 42: Ergebnisse des Treibhauspotentials (GWP) für die adaptive und konventionelle Fassade.....	117
Abbildung 43: Ergebnisse des Primärenergiebedarfs aus nicht-erneuerbaren Ressourcen (PE_{ne}) für die adaptive und konventionelle Fassade	118
Abbildung 44: Ergebnisse des Treibhauspotentials (GWP) der adaptiven Fassade in Deutschland, Finnland und Saudi-Arabien	119
Abbildung 45: Wechselwirkungsanalyse in Kreisform	168
Abbildung 46: Wechselwirkungsanalyse in orthogonaler Form.....	169

Glossar

Adaptivität	Autonome und dynamische Anpassung auf die Rahmenbedingungen des Umfelds [100, 123].
Adaptionslevel	Das Vorhandensein von einer höheren oder niedrigeren Anzahl an adaptiven Systemen im Gebäude [112].
Adaptives Gebäude	Ein Gebäude das adaptive Systeme integriert. Es kann dabei verschiedene Adaptionslevel besitzen.
Adaptives System	Ein System, das aufgrund von äußeren Einwirkungen Veränderungen erzeugen kann. Veränderungen können passiv durch Materialeigenschaften [117] oder aktiv durch Aktoren, Sensoren und Regelungseinheiten ausgeführt werden [100, 123].
Aktuierung	Die Ansteuerung und Aktivierung der Aktoren.
Benchmark	Ein Vergleichsmaßstab in Form von Durchschnittswerten.
Bruttogrundfläche	Die Gesamtfläche des Gebäudes [24].
Einflussfaktoren	Variable Knotenpunkte eines Systems, deren dynamische Ordnung zu einem Wirkungsgefüge führen [129].
Endenergiebedarf	„Ist die Energiemenge, die dem Gebäude unter der Annahme von standardisierten Bedingungen und unter Berücksichtigung der Energieverluste zugeführt werden muss [...].“ [38]
Funktionelle Einheit	Der quantifizierte Nutzen eines Produktsystems, der in der Ökobilanz als Vergleichseinheit dient [29].
Funktionssystemebene	Teile des Gebäudes, die eine eigenständige Funktion erfüllen. Beispiele sind das Tragwerk oder die Gebäudehülle.
Gebäudehülle	Stellt die Ummantelung des Gebäudes dar und teilt sich in die Fassaden und das Dach auf [63, 117].
Gebäudesystemebene	Das Gebäude wird als Einheit betrachtet. Eine Auflösung in einzelne Bestandteile findet nicht statt.

Gesamtsystemebene	Die Gesamtsystemebene ist das vollständige Gebäude, das sich aus allen Komponenten inklusive seiner Funktionen zusammensetzt.
Komponente	Stellt ein Einzelteil des Gebäudes dar. Alle Einzelteile zusammen ergeben die Gesamtsystemebene.
Komponentensystemebene	Ein Gebäude besteht aus einzelnen Komponenten, also Bestandteilen, die als Ganzes die Gebäudesystemebene darstellen. Komponenten sind zum Beispiel nicht tragende Fassaden oder Gebäudedecken.
Konventionelles Gebäude	Passives Gebäude, welches nach dem derzeitigen Stand der Technik geplant und gebaut wird.
Ökobilanz	„Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ [30].
Planerin	Hauptverantwortliche Person im Planungsprozess adaptiver Gebäude.
Regelung	Umfasst das kontinuierliche Überwachen, Identifizieren, Entscheiden und Ausführen des adaptiven Systems oder der zu überwachenden Größe [123].
Sachbilanz	„Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst“ [29].
Umweltaspekt	„Bestandteil der Tätigkeit oder Produkte oder Dienstleistung einer Organisation, der auf die Umwelt einwirken kann“ [28].
Umweltwirkungen	„Mess- und beobachtbare Veränderungen in der natürlichen Umwelt“ [108].

1 Einführung

Der weltweite Erdüberlastungstag (engl. Earth Overshoot Day) im Jahr 2019 war am 29. Juli. Bereits zur Jahresmitte war das gesamte Jahresbudget an begrenzten Ressourcen aufgebraucht [35]. In Deutschland wurde 2019 das Ressourcenbudget sogar schon bis zum 3. Mai verbraucht [127]. Schon um 1700 problematisierte Hans Carl von Carlowitz das menschliche Verhalten, indem er verlangte, dass nur so viel Holz aus dem Wald geschlagen werden dürfe, wie in einem Jahr auch nachwüchse [17]. Von Carlowitz' Aussage gilt als Grundstein der weltweiten Nachhaltigkeitsbewegung, die trotz jährlicher drastischer Zunahme an Ressourcenverbrauch immer noch nicht gebührend Gehör bekommt. Ausreichende Handlungen gegen die Ausbeutung der Natur bleiben bisher aus [80].

Wegen des Umgangs mit den Ressourcen der Erde werden signifikant schädliche Umweltwirkungen erzeugt, zum Beispiel in Form von zu hohen Treibhausgasemissionen, infolge derer sich die Erde erwärmt und somit auch das menschliche Leben gefährdet wird [109]. Diese Entwicklungen erzeugen politische Bewegungen, wie Fridays for Future. Wöchentlich gehen unter anderem Schülerinnen und Wissenschaftlerinnen auf die Straße, um für die Einhaltung und Umsetzung des Pariser Klimaabkommens und der damit verbundenen Begrenzung der globalen Klimaerwärmung auf unter 1,5 °C zu demonstrieren. [44] Den weltweit größten Anteil an Treibhausgasemissionen hat mit fast 40 % das Bauwesen [79]. Um das 1,5 °C Ziel zu erreichen und das damit verbundene Ressourcenbudget nicht bis Mitte des Jahres aufzubrauchen, liegt hier ein wichtiger Stellhebel.

In Abbildung 1 ist schematisch dargestellt, welche Bereiche des Bauwesens den größten Beitrag zur Klimaänderung leisten. Bei Gebäuden, die nach Energieeinsparverordnung (EnEV) gebaut sind, entstehen ca. 90 % des Treibhauspotentials (GWP, engl. Global Warming Potential) im Bereich des Betriebs also des Heizens, Lüftens und Kühlens. Etwa 10 % sind dem Bereich der Konstruktion zuzuordnen. Dazu gehören die Herstellung, der Austausch von Komponenten und das Lebensende. Durch den Trend zu Passiv- und Plusenergiegebäuden sollen schädliche Umweltwirkungen reduziert werden. Jedoch nimmt dabei der relative Anteil der Konstruktion und der aufgewendeten Materialien weiter zu. [9, 106]

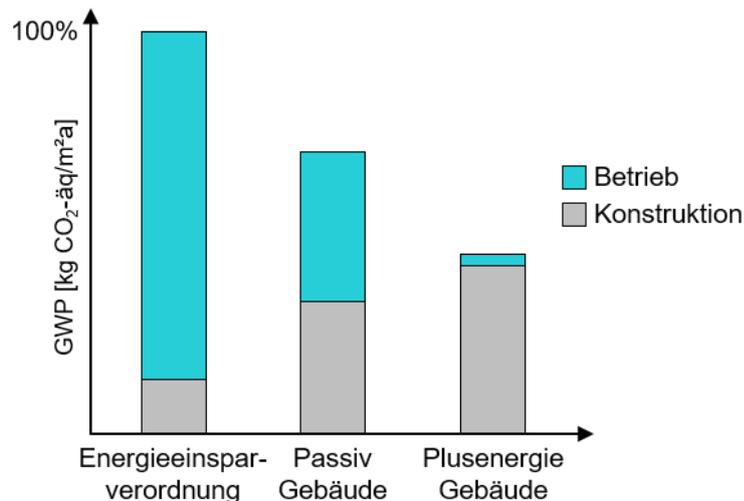


Abbildung 1: Treibhauspotential (GWP) verschiedener Gebäudevarianten aufgeteilt in Konstruktion und Betrieb in Anlehnung an [112]

Derzeit gebaute, konventionelle Gebäude sind dafür ausgelegt, dem hypothetisch größten Lastfall, wie dem eines Erdbebens, standzuhalten. Für die überwiegende Zeit der Lebensdauer eines Gebäudes ist dieses also überdimensioniert. [135] Im Sonderforschungsbereich (SFB) 1244 „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ an der Universität Stuttgart werden Lösungen erforscht, um Aktor-Sensor-Systeme in Gebäude zu integrieren und damit Funktionen zu erfüllen, die bislang unter anderem durch überdimensionierte Bauteile erreicht wurden. Der Einsatz von Baumaterialien und schädlichen Umweltwirkungen über den Lebenszyklus eines Gebäudes wird dadurch reduziert [120]. Die Integration von sogenannten adaptiven Systemen in Tragwerke kann Spannungsspitzen reduzieren, Schwingungen dämpfen, die Lebensdauer verlängern und die Dimensionierung von Bauteilen verringern [73]. Adaptive Gebäudehüllen bieten neben der Massenreduktion Potentiale, elektrische Energie in der Betriebsphase einzusparen, indem zum Beispiel äußere Einwirkungen wie Winde oder Sonneneinstrahlung genutzt werden, um im Sommer zu kühlen oder im Winter zu heizen [118].

1.1 Motivation und Ziel

Derzeit werden die Umweltwirkungen von Gebäuden vorwiegend am Ende der Bauprojekte bestimmt, um zum Beispiel Zertifizierungen zu erlangen. Zu diesem Zeitpunkt sind Änderungen am Gebäude kaum mehr möglich. [10] Abbildung 2 zeigt

diesen Zusammenhang, woraus zu Beginn der Planung die Umweltwirkungen wesentlich beeinflussbarer sind als im weiteren Verlauf. Gleichzeitig ist zu Beginn der Planung der Aufwand für Änderungen sehr gering. Dieser steigt entlang der Planung simultan zum Wissen über das Gebäude. [7, 10] Für eine effektive Minimierung schädlicher Umweltwirkungen durch adaptive Gebäude sind diese schon beginnend mit den frühen Planungsphasen bis hin zur Inbetriebnahme zu fokussieren. Eine große Herausforderung für die Abschätzung der Umweltwirkungen in frühen Planungsphasen besteht jedoch in der niedrigen und variablen Datengrundlage zu Beginn der Planung.

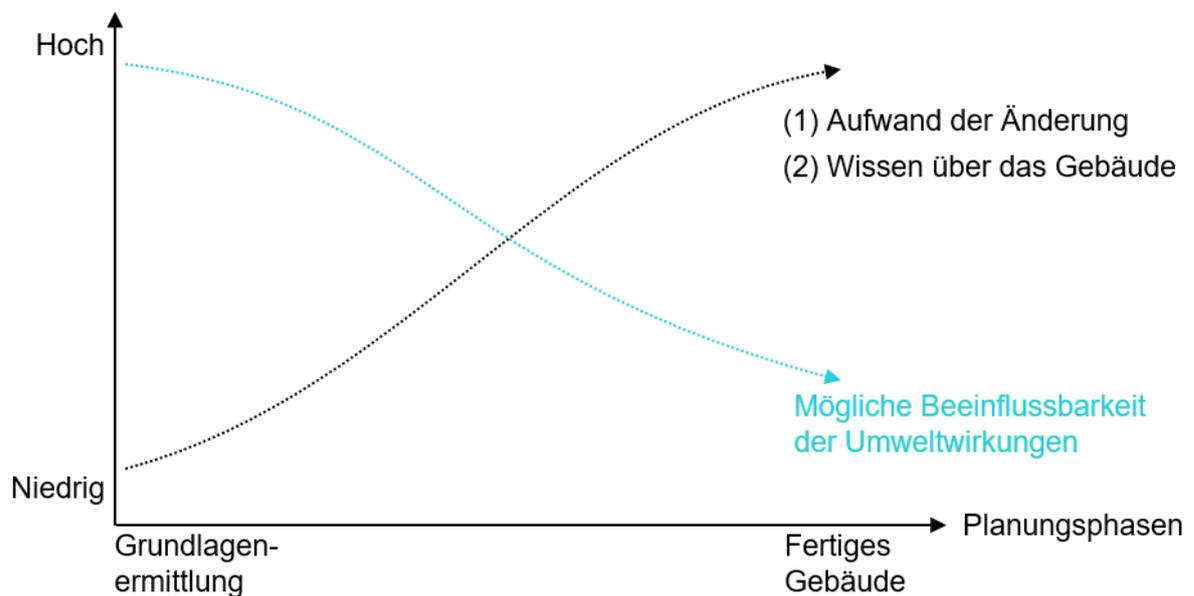


Abbildung 2: Möglichkeiten zur Beeinflussung der Umweltwirkungen in den Planungsphasen von Gebäuden in Anlehnung an [7, 10]

Geiger et al. [52] haben berechnet, dass ein adaptives Tragwerk besser von vornerein in seiner Gesamtheit optimiert wird, anstatt ein konventionell geplantes Tragwerk zunächst zu optimieren und dann zu aktuieren. So gelingt es, mehr Aktuierungsenergie und Tragwerksmasse zu reduzieren. [52] Das heißt, dass der Planungsprozess adaptiver Gebäude von dem der konventionellen Planung abweichen muss, um adaptive Gebäude möglichst effizient zu entwerfen [70]. Adaptive Systeme in Gebäude zu integrieren, erfordert neue Planungsaufgaben, wie zum Beispiel umfassendere Sicherheitskonzepte oder eine optimierte Akteurplatzierung [73]. Um diese neuen Planungseinflüsse und -aufgaben zu bearbeiten, sind neue Fachdisziplinen, wie der Maschinenbau, in den Planungsprozess zu integrieren und die

Aufgabenvielfalt bereits involvierter Fachdisziplinen, wie der Systemdynamik, anzupassen [72]. Die Integration solcher Fachdisziplinen führt zu mehr Interdisziplinarität, neuen Systemgefügen und komplexeren Abstimmungen im neuartigen Planungsprozess adaptiver Gebäude.

Eine gesteigerte Aufgabenvielfalt und die zunehmenden Abstimmungen im Planungsprozess adaptiver Gebäude ergeben ein großes Systemgebilde von wechselwirkenden Einflussfaktoren. Eine Entscheidung über die Materialwahl der Struktur kann die Platzierung der Aktorik oder die Behaglichkeit stark beeinflussen. Die große Anzahl an Entscheidungen birgt die Gefahr, das Ziel der Ressourceneffizienz und Reduktion der schädlichen Umweltwirkungen nicht konstant verfolgen zu können. Beispielsweise wäre eine alleinige Verschiebung der schädlichen Umweltwirkungen von der Herstellungsphase (durch die Reduktion der Masse) in die Betriebsphase (durch einen erhöhten Energieverbrauch bei der Aktuierung) nicht zielführend. Aktuierung bedeutet die Ansteuerung und Aktivierung der Aktoren. Der Energieverbrauch für die Aktuierung der Betriebsphase kann wiederum stark von den sich verändernden Einwirkungen, wie Winde, abhängig sein, die nur geringfügig planbar sind. Um lebenszyklusübergreifende Umweltaspekte aussagekräftig abschätzen zu können, ist ein umfassendes Systemverständnis über den neuartigen Planungsprozess adaptiver Gebäude und ihrer Umweltaspekte erforderlich. Das Systemverständnis ist für eine mehrdimensionale Betrachtungsweise nötig und um wichtige Zusammenhänge zu erfassen.

Es bestehen bereits Konzepte wie Level(s) [33, 34] oder der Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy Efficient Buildings Initiative (EeBGuide) [48], die unter anderem dabei unterstützen, die Umweltaspekte während des Planungsprozesses des konventionellen Gebäudebaus zu fokussieren. Diese Konzepte eignen sich jedoch nur für die Unterstützung des Planungsprozesses konventioneller Gebäude. Eine einfache Übertragung auf die Planung adaptiver Gebäude ist nicht möglich, da sich deren Planungsprozess zum einen unterscheidet und zum anderen die bestehenden Konzepte nicht für die technische Erfassung der neuen Komponenten adaptiver Systeme in Herstellung und Betrieb ausgelegt sind. Besonders der Betrieb stellt mit seinem dynamischen Energieverbrauch eine wesentliche Herausforderung dar, um die Umweltwirkungen abzuschätzen. Die Dynamiken, ausgelöst durch variable Einwirkungen, können bislang nicht hinlänglich strukturiert und erfasst werden, um eine geeignete Datengrundlage zu generieren.

Für die Abschätzung von Umweltaspekten adaptiver Gebäude muss daher der neuartige Planungsprozess adaptiver Gebäude als Grundlage dienen und Möglichkeiten gefunden werden, wie die Daten über alle Planungsphasen verfügbar gemacht werden.

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, eine Methodik zu entwickeln, mit der im Planungsprozess von adaptiven Gebäuden Abschätzungen über deren lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen getroffen werden können. Die Abschätzung der Umweltwirkungen sollen der Planerin adaptiver Gebäude ermöglichen, ein geeignetes adaptives System zu konzipieren, um die schädlichen Umweltwirkungen weitgehend zu reduzieren.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit ist in Abbildung 3 dargestellt und gliedert sich in neun Kapitel. Der erste Schritt beinhaltet die Motivation, das Ziel und den Aufbau der Arbeit. Anschließend folgt die Beschreibung des Stands des Wissens aufgeteilt in die Grundlagen, den Stand der Forschung und die Analyse der Inhalte hinsichtlich der Zielstellung dieser Arbeit. Wesentliche Aspekte sind die adaptiven Gebäude, Planungsphasen von Gebäuden, Grundlagen der Ökobilanz im Bauwesen und Möglichkeiten im Umgang mit Komplexität. In Kapitel drei werden die methodischen und praktischen Anforderungen an die Methodik dargestellt und es wird die Vorgehensweise bei der Methodikentwicklung beschrieben. Gegenstand des vierten Kapitels ist eine umfassende Systemuntersuchung. Dafür wird im ersten Schritt der Untersuchungsrahmen der Methodik festgelegt. Anschließend wird ein Einflussfaktorenkatalog aufgestellt und die Einflussfaktoren werden anschließend auf deren Wechselwirkungen untersucht. Eine Interpretation dieser schließt sich an und ferner Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen aus der Systemuntersuchung. Kapitel fünf leitet die Methodik und deren Ablauf ausführlich her und beschreibt diese. Anschließend wird in Kapitel sechs die praktische Anwendbarkeit der Methodik anhand von zwei Beispielen demonstriert. Inhalt des Kapitels sieben ist die Evaluierung der Methodik und das Aufzeigen ihrer Möglichkeiten und Grenzen. In Kapitel acht und neun wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf weitere Arbeiten abgeschlossen.

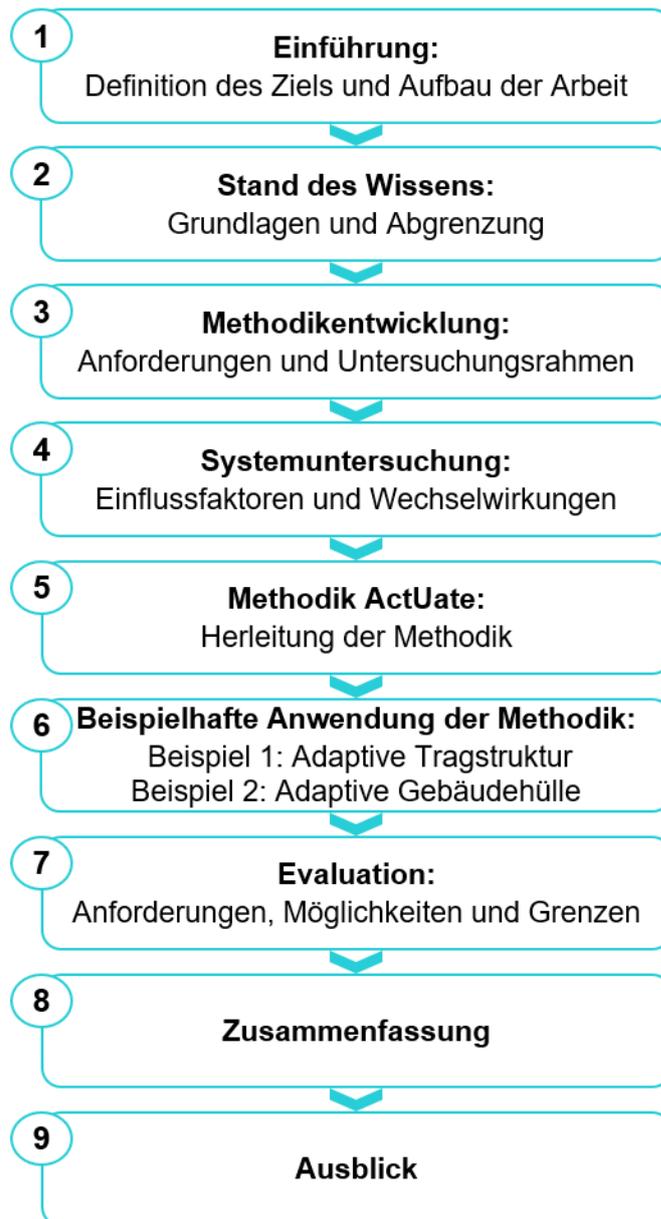


Abbildung 3: Aufbau der Arbeit

2 Stand des Wissens

Das Kapitel Stand des Wissens gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil werden die relevanten Grundlagen dieser Arbeit beschrieben. Der zweite Teil stellt aktuelle Arbeiten zu Umweltaspekten in Planungsphasen von Bauprojekten vor und diskutiert diese. Abschließend wird der Stand des Wissens analysiert, in dem die verschiedenen Arbeiten auf ihre Lösungsansätze und Lücken hinsichtlich der Zielstellung dieser Arbeit untersucht werden.

2.1 Grundlagen

In diesem Kapitel wird ein Überblick über relevante Hintergrundinformationen dieser Arbeit gegeben. Dazu zählen Adaptivität im Bauwesen (Kapitel 2.1.1), Planungsphasen von Gebäuden (Kapitel 2.1.2), Umweltaspekte (Kapitel 2.1.3) sowie komplexe Systeme (Kapitel 2.1.4). Ziel ist es ein fundiertes Verständnis zu generieren, um dieses im Anschluss zu analysieren und darauf aufzubauen.

2.1.1 Adaptivität im Bauwesen

Das Wirkprinzip von Adaptivität kommt in vielfältigen Bereichen wie in der Medizin oder den Ingenieurwissenschaften zum Einsatz. Dieses Kapitel erläutert das Prinzip der Adaptivität für das Bauwesen. Zu Beginn wird das Funktionsprinzip adaptiver Systeme beschrieben und anschließend werden die Anforderungen, Herausforderungen und Möglichkeiten adaptiver Tragwerke und adaptiver Gebäudehüllen dargestellt.

Adaptive Systeme

Adaptivität kommt vom lateinischen Wort *adaptare* und bedeutet anpassen. Adaptive Systeme können sich autonom an die Rahmenbedingungen des Umfelds anpassen [100, 123]. Die Integration adaptiver Systeme in die gebaute Umwelt ermöglicht die Erhöhung der Funktionalität durch eine gezielte Veränderbarkeit und Anpassungsfähigkeit von Materialeigenschaften, Bauteileigenschaften und Geometrieigenschaften an äußere Umgebungseinflüsse [120]. Äußere Umgebungseinflüsse können u.a. klimatische Einwirkungen oder Einwirkungen durch den Menschen sein [118]. Die Anwendung adaptiver Systeme im Bauwesen hat unter anderem zum Ziel, den hohen Materialeinsatz der Herstellung zu minimieren, um – über den gesamten Lebenszyklus betrachtet – schädliche Umweltwirkungen zu reduzieren [120].

Adaptive Systeme im Bauwesen lassen sich in zwei Gruppen aufteilen, aktive und passive adaptive Systeme. Passive adaptive Systeme passen sich ohne weiteren Bedarf von externer elektrischer Energie an die Umwelt an, etwa durch die Nutzung von Materialeigenschaften. [117] In einem passiv adaptiven System können auf Grund ihrer Materialeigenschaften beispielsweise Phasenwechselmaterialien (PCM, engl. Phase Change Material) eingesetzt werden. PCM können unterschiedliche Aggregatzustände annehmen, wodurch auf der Basis ihrer Schmelzenthalpie unterschiedlich viel Wärme absorbiert oder emittiert wird. So werden PCM durch Wärmezuführung flüssig und erhöhen damit die thermische Speicherfähigkeit. Räumen werden verlangsamt aufgewärmt. Sinkende Temperaturen bewirken, dass das PCM wieder fest und die latent gespeicherte Wärme wieder abgegeben wird. Die Eigenschaft von PCM eignen sich besonders bei Leichtbauten, um fehlende thermische Speichermasse zu ersetzen. [82] Aktive adaptive Systeme bestehen, wie in Abbildung 4 zu sehen ist, in der Regel aus den drei Hauptbestandteilen Aktoren, Sensoren und Regelungseinheit [123].

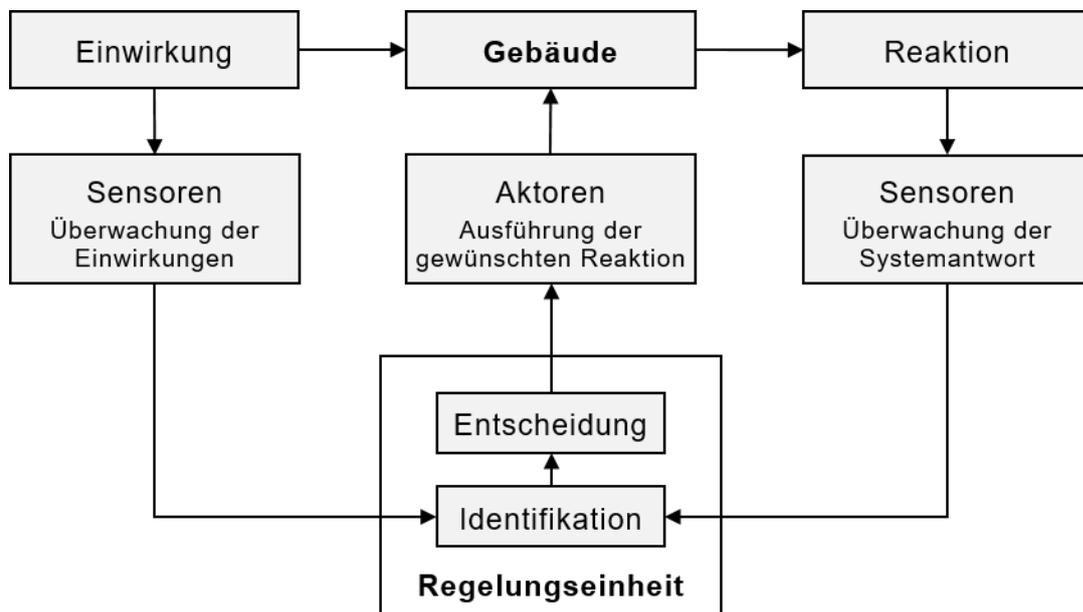


Abbildung 4: Funktionsprinzip adaptiver Systeme in Anlehnung an [123]

Die Sensoren erfassen den Zustand oder mögliche Änderungen des Umfeldes wie das Auftreten von Wind. Durch die Regelungseinheit wird dieses Signal verarbeitet. Bei einem Signal, welches eine Änderung des Systems erfordert, wird in der Regelungseinheit eine Entscheidung zur Handlung der Aktoren erzielt. Durch die Aktuierung verändern die Aktoren daraufhin die nötigen Eigenschaften des Systems, wie

zum Beispiel die Geometrie, um bei starkem Wind eine erhöhte Stabilität der Struktur zu erhalten. [100, 123]

Werden adaptive Systeme in Gebäude integriert, wird dies nachfolgend als adaptives Gebäude bezeichnet. Ein Beispiel für ein aktiv adaptives Gebäude stellt das weltweit erste adaptive Demonstrator Hochhaus dar. Dieses wird derzeit zu Forschungszwecken im Rahmen des SFB 1244 in Stuttgart gebaut. Das Demonstrator Hochhaus besitzt eine quadratische Grundfläche mit Außenmaße von 5,40 m x 5,40 m und umfasst 12 Stockwerke mit einer Geschosshöhe von 3 m. [134, 135] Durch das Demonstrator Hochhaus sollen zu Forschungszwecken zum Beispiel Simulationen verschiedener Lastfälle von unterschiedlichen Schwingungszuständen getestet und ausgewertet werden [73]. Ebenso sollen adaptive Fassaden für das Demonstrator Hochhaus entwickelt, gebaut und getestet werden. Ein Beispiel für ein passiv adaptives Gebäude ist das Taipei 101 in Taipei, das mit 508 Metern eins der höchsten Gebäude der Welt ist. Äußere Einwirkungen wie Wind und Erdbeben erzeugen bei Hochhäusern dieser Art besonders in den oberen Stockwerken starke Schwingungen. Diesen soll im Taipei 101 mit einem Schwingungstilger entgegengewirkt werden. Der Schwingungstilger besteht aus einer Kugel mit einem Durchmesser von fünfeinhalb Metern, welche mit Stahlseilen im oberen Bereich des Hochhauses montiert ist. Die Kugel bildet mit dem Hochhaus ein gekoppeltes Pendel und verhindert dadurch horizontale Auslenkungen. [131]

Adaptive Gebäude besitzen ein bestimmtes Adaptionlevel, das eine höhere oder niedrigere Anzahl an adaptiven Systemen, egal ob aktiv oder passiv, im Gebäude beinhalten kann [111]. Es kann auch schon dann als solches definiert werden, wenn nur einzelne Komponenten im Gebäude adaptiv geregelt werden. Um ein adaptives Gebäude handelt es sich also schon, wenn bei diesem die Lüftung adaptiv geregelt wird. Konventionelle Gebäude stehen in dieser Arbeit für herkömmliche und passive Gebäude, wie sie derzeit mit dem aktuellen Stand der Technik geplant und gebaut werden. Sowohl konventionelle wie auch adaptive Gebäude bestehen aus Gebäudehülle und Tragwerk. Diesen gilt die nachfolgende Beschreibung.

Adaptive Tragwerke

Ein Tragwerk erfüllt die Hauptfunktion, die vollständige Last des Gebäudes abzutragen, also standsicher zu sein [63]. Bei konventionellen Tragwerken gelingt dies unter anderem durch hohen Materialeinsatz. Adaptive Tragwerke wirken der Überdimensionierung durch geringeren Materialeinsatz entgegen und passen sich an die

Belastungszustände durch Manipulierung des Tragverhaltens an. [100, 117, 123] Das heißt konkreter, dass das Lastabtragverhalten beeinflusst werden kann, indem auftretende kritische Spannungsspitzen, ausgelöst durch beispielsweise Winde oder Erdbeben, verringert sowie Verformungen und Schwingungen optimiert werden [73, 100]. Dadurch lassen sich die Bemessungsquerschnitte und der Materialeinsatz deutlich reduzieren [73]. Darüber hinaus kann durch adaptive Tragwerke eine Verlängerung der Nutzungsdauer erreicht werden [102].

Die Einwirkungen auf Gebäude, konventionelle wie auch adaptive, können vielfältig sein. Nach DIN EN 1990 lassen sich diese für Tragwerke in ständige Einwirkungen, veränderliche Einwirkungen und außergewöhnliche Lasten einteilen, wie auch in Abbildung 5 zu sehen ist. [27]

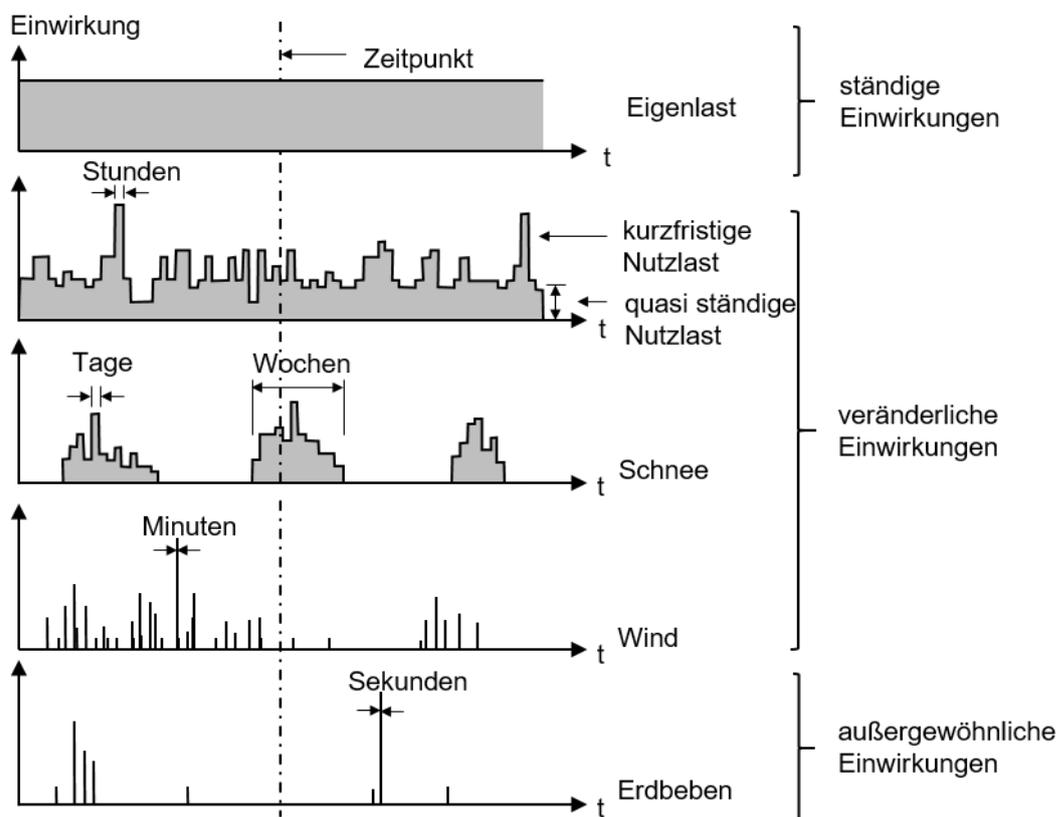


Abbildung 5: Einwirkungen auf Tragwerke in Anlehnung an [136]

Eine ständige Einwirkung kann zum Beispiel das Eigengewicht durch das Tragwerk selbst darstellen. Veränderliche Einwirkungen wie Nutzlasten, Wind- oder Schneelasten haben unterschiedliche Lastprofile, die von einer minütlichen bis hin zu einer wöchentlichen Auflösung reichen können. Außergewöhnliche Lasten, wie Explosionen oder Erdbeben sind in der Regel kurze Einwirkungen. [136] Für Gebäudehüllen

sind zusätzlich noch weitere klimatische Einwirkungen wie Sonnenstrahlung oder Feuchte sehr bedeutsam. Dies wird im Bereich der adaptiven Gebäudehüllen näher beleuchtet.

Um den theoretischen Einwirkungen auf Tragwerke standzuhalten, werden konventionelle Tragwerke und Gebäude zurzeit auf den anzunehmenden Extremfall ausgelegt und zusätzlich noch mit Teilsicherheitsbeiwerten angepasst, so dass keine Überschreitung von Grenzzuständen eintreten kann [27, 136]. Diese Auslegung führt zu signifikantem Materialaufkommen, das in Abhängigkeit von den in der Praxis tatsächlich auftretenden Lasten nur selten oder gar nicht in der Nutzungsphase von Gebäuden benötigt wird. Adaptive Gebäude sollen dieses Materialaufkommen reduzieren und vor allem den selten auftretenden Einwirkungen durch adaptive Systeme entgegenwirken. [121]

In Abbildung 6 ist ein Prototyp des zuvor beschriebenen Tragwerks des Demonstrator Hochhauses dargestellt. In blau sind die eingesetzten Aktoren zu sehen. Durch den Hydraulikzylinder auf der linken Seite können zum Beispiel Auflagerverschiebungen durchgeführt werden, um bei äußeren Einwirkungen Änderungen am Systemverhalten zu bewirken. [135]



Abbildung 6: Adaptives Tragwerk des Prototypens im Sonderforschungsbereich (SFB) 1244 [77]

Ein weiteres Beispiel adaptiver Tragwerke kann durch die Integration von Fluidaktoren umgesetzt werden. Diese können, im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Hydraulikzylindern, direkt in Tragwerkselemente eingebaut werden die an den Auflagern platziert sind. Fluidaktoren können die potentielle Energie eines einströmenden Fluids, wie zum Beispiel Öl, in mechanische Arbeit umwandeln. Durch die inneren Aktuierungen können Tragwerke abschnittsweise manipuliert werden. Die Aktuierungen lassen sich durch eine Expansion in der Druckzone, einer Kontraktion in der Zugzone oder einer Kombination daraus erzeugen. [83] In Abbildung 7 ist das Funktionsprinzip von Fluidaktoren am Beispiel eines Balkens zu sehen.

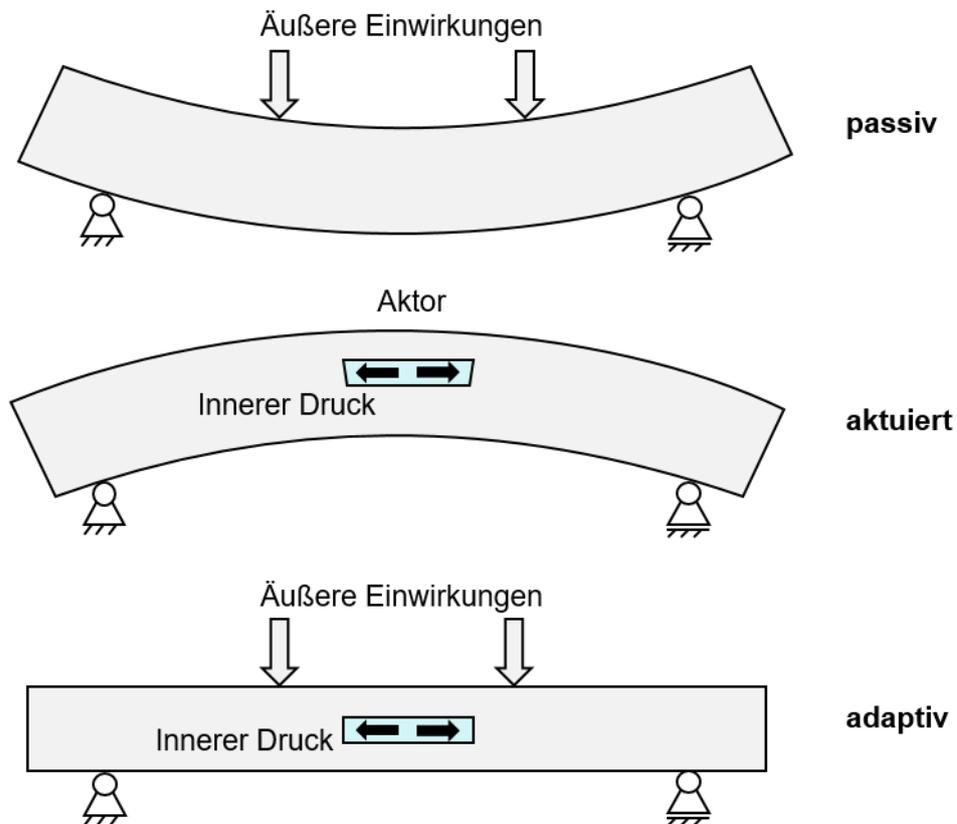


Abbildung 7: Funktionsprinzip von Fluidaktoren in Balken in Anlehnung an [133]

Der obere Balken zeigt, wie sich ein konventioneller Balken unter linearer Last durchbiegt. Im mittleren Balken führt die Aktuierung der Fluidaktoren zu einer theoretischen Expansion in der Druckzone und ohne äußere Einwirkungen damit zu einer Durchbiegung. Der unterste Balken stellt einen adaptiven Balken dar, der trotz äußerer Einwirkungen durch die Aktuierung der Fluidaktoren nahezu keine Durchbiegung erfährt. [133]

Adaptive Gebäudehüllen

In einem ersten Schritt werden die allgemeinen Funktionen und Aufgaben von Gebäudehüllen beschrieben. Anschließend folgt eine Darstellung der Besonderheiten adaptiver Gebäudehüllen.

Die Gebäudehülle teilt sich in die Fassade und das Dach auf [117]. Diese stellt damit die Ummantelung des Gebäudes und somit die Trennung von innen und außen dar [63]. Grundsätzlich besitzt die Gebäudehülle die Funktion, das Bauwerk von äußeren Einflüssen zu schützen. Die äußeren Einflüsse sind vielfältiger Art und stellen

unter anderem die klimatischen Bedingungen dar, wie Wind und Sonneneinstrahlung, aber auch die Einwirkung von Lärm und Erdbeben. [118] Die Vielfalt an äußeren Einwirkungen ist in Abbildung 8 dargestellt.

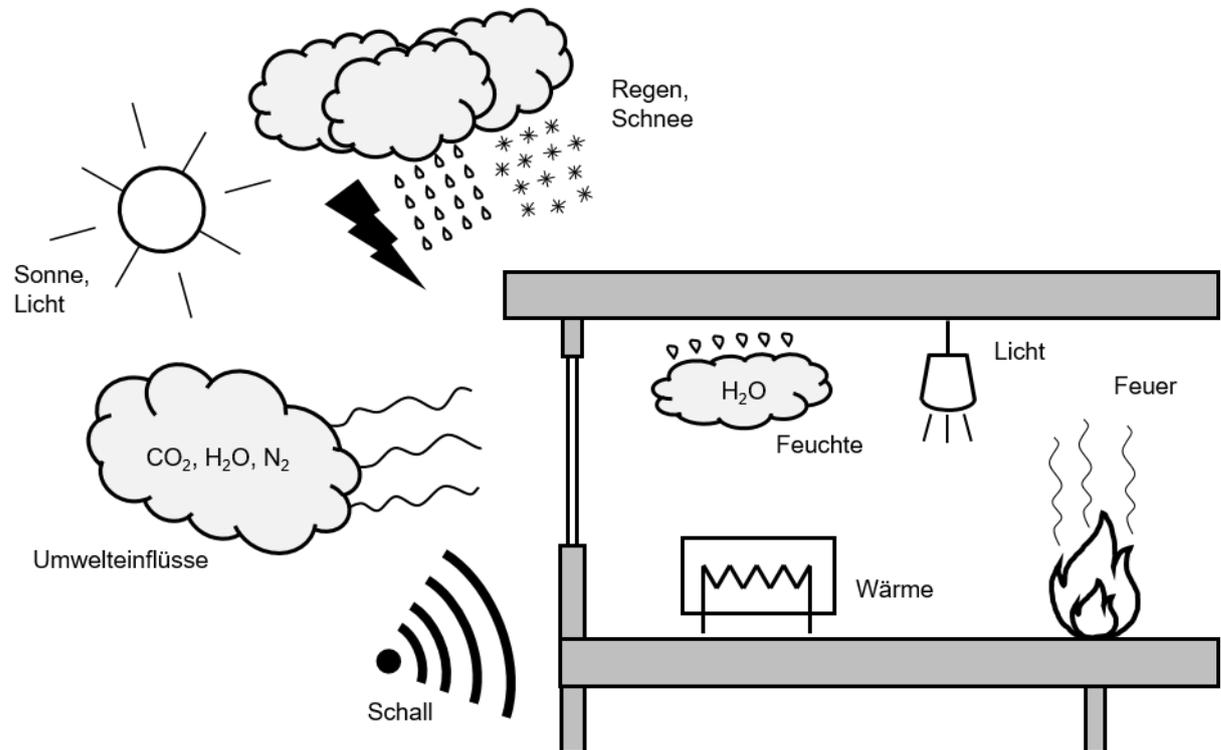


Abbildung 8: Einwirkungen auf Gebäudehüllen in Anlehnung an [95]

Die Gebäudehülle hat daher verschiedene Schutzfunktionen zu erfüllen, um den äußeren wie auch inneren Einflüssen standzuhalten und die Behaglichkeit im Raum zu sichern [63]. Die Schutzfunktionen beinhalten vor allem bauphysikalische Anforderungen wie den Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz, Brandschutz, Lichtschutz sowie akustische und energetische Ansprüche [60, 63, 98]. Für die Sicherstellung der Schutzfunktionen gibt es zahlreiche Kenngrößen in Normen und Richtlinien, die eingehalten werden müssen. Zum Beispiel ist der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) ein Maß, wie gut oder schlecht die wärmedämmenden Eigenschaften eines Bauteils sind. Nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) [38] darf dieser bei höchstens 0,28 W/m²K für Konstruktionen wie die der Fassade liegen. [38] Zusätzlich kann eine Fassade auch noch Ver- und Entsorgungsfunktionen wie beispielsweise die Energiegewinnung durch Solarpanels oder die Beleuchtung übernehmen. Darüber hinaus können Fassaden auch als tragende Bauteile fungieren. [63, 98]

Adaptive Fassaden haben zum Ziel, den Energiebedarf im Betrieb zu reduzieren, ohne die Materialeffizienz zu vernachlässigen. Infolgedessen ergeben sich einige neue Kriterien und Herausforderungen für die bauphysikalischen Eigenschaften. Dies wird am Beispiel des Wärmeschutzes beschrieben.

Die Reduktion der flächenbezogenen Masse kann zu einigen Herausforderungen wie einer geringeren Wärmespeicherkapazität bei Fassaden führen. Dies bedeutet, dass es im Sommer, wenn es außen wärmer ist als innen, sowie umgekehrt im Winter, zu größeren Temperaturamplituden kommen kann als bei herkömmlichen massiven Bauweisen. Das Gebäudeinnere erwärmt sich stärker und kühlt schneller aus. Durch die Integration adaptiver Systeme können diese Herausforderungen überwunden werden, indem zum Beispiel ein wärmeleitender und ein wärmedämmender Zustand mit derselben adaptiven Fassade ermöglicht wird. Der wärmedämmende Zustand kann zum Beispiel mit einem U-Wert von $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ eingestellt werden, wenn die außen vorherrschende Temperatur nicht der des Raumes entsprechen soll. Der wärmeleitende Zustand mit einem entsprechend höheren U-Wert wird eingestellt, um eine erhöhte Luftdurchlässigkeit zu erzeugen. Durch diesen adaptiven Wechsel der Zustände kann Energie, um Kühlung und Heizung zu betreiben, eingespart werden. Dieser Zustandswechsel lässt sich beispielsweise mit Membrankissen durchführen, die für den wärmedämmenden Zustand mit Luft befüllt und für den wärmeleitenden Zustand entlüftet werden. [60] Neben dem Wärmeschutz sind ebenso die weiteren bauphysikalischen Eigenschaften und Anforderungen auf die Anwendung adaptiver Systeme auszulegen.

Im Vergleich zu adaptiven Tragwerken werden adaptive Fassaden derzeit schon vermehrt mit dem Ziel entworfen und gebaut, schädliche Umweltwirkungen zu reduzieren. Aus den gebauten Fassaden lassen sich Funktionskategorien ableiten [67]:

- **Licht- und strahlungsadaptive Fassaden:** Diese reagieren auf eintreffende Sonnenstrahlen. Die Fassaden arbeiten zum Beispiel mit Verschattungselementen, um die Heiz- und Kühlenergie zu reduzieren. [67] So ist für Fassaden eine auf Sonnenstrahlen reagierende Jalousie bereits eine adaptive Möglichkeit.
- **Wärmeadaptive Fassaden:** Durch die aktive Nutzung der vorherrschenden Wärme sollen auch hier Heiz- und Kühlenergie reduziert werden. Wie zuvor beschrieben, kann beispielsweise über Membrankissen zwischen einem wärmedämmenden und wärmeleitenden Zustand gewechselt werden. [60]

- **Lüftungsadaptive Fassaden:** Diese verfolgen das Ziel, die Anwendungsdauer der mechanischen Belüftung zu reduzieren. Die Lüftung kann beispielsweise mit adaptiven Öffnungen im Textil der Fassade erzeugt werden und muss damit nicht über das Fenster erfolgen. [56]
- **Feuchteadaptive Fassaden:** Um eine passende Luftfeuchtigkeit in Räumen zu erzeugen, wird die vorherrschende Luftfeuchtigkeit abgeführt oder erhöht [67]. Eine beispielhafte Umsetzung ist das passiv adaptive System der feuchteadaptiven Dampfbremse. Diese passt ihre Dampfdurchlässigkeit adaptiv an die umgebende Luftfeuchtigkeit an. So gelingt eine sommerliche Austrocknung, ohne eine winterliche Feuchtezufuhr befürchten zu müssen. [87]
- **Akustisch-adaptive Fassaden:** Akustisch-adaptive Fassaden reagieren auf akustische Hintergrundgeräusche, wie zum Beispiel Straßenlärm, um durch Dämpfungen eine angemessene Raum- und Lebensqualität zu schaffen. [113] Dies gelingt unter anderem dadurch, dass Fluide in Schichten der Fassade eingefüllt werden. Die Fluide werden dann je nach der Lautstärke der akustischen Hintergrundgeräusche eingesetzt. [116]
- **Kombination:** Die genannten Kategorien können zudem kombiniert werden, um möglichst viele Funktionen in adaptiven Fassaden zu integrieren und den Ressourcenverbrauch zu reduzieren.

Es gibt noch weitere Funktionen, die durch adaptive Fassaden erfüllt werden können, die jedoch nicht zum Zweck der Reduktion von schädlichen Umweltwirkungen gedacht sind. Ein Beispiel ist die Medienübertragung [46]. Darüber hinaus bieten sich Gebäudehüllen an, elektrische Energie, zum Beispiel in Form von Solarstrahlung, zu gewinnen. Dies wurde beispielsweise bei den Forschungsarbeiten zu adaptiven Solarfassaden der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich umgesetzt. Dabei wurden Verschattungselemente entwickelt, auf deren sonnengewandten Seite Photovoltaik-Module integriert sind. [122]

Bei Betrachtung einer adaptiven Gebäudehülle sind immer auch deren Auswirkungen auf den Raum mit zu berücksichtigen. Ein wesentliches Qualitätsmerkmal eines Raumklimas ist, ob der Mensch sich gerne im Raum aufhält und sich thermisch behaglich fühlt. Die thermische Behaglichkeit bei adaptiven Gebäuden hängt maßgeblich von den Fassaden ab. [89] In der DIN EN ISO 7730 [31] ist die thermische Behaglichkeit „als das Gefühl, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt“, definiert. Fanger entwickelte ein Modell, um die thermische Behaglichkeit vorherzusagen, um dadurch das Raumklima einschätzen zu können. Dieses Modell

ist in der DIN EN ISO 7730 vereinheitlicht worden. [31] Eine Grundannahme des Modells ist, dass der Raum als thermisch behaglich gilt, wenn 80% der Menschen ihn auch so empfinden. Auf Basis verschiedener Kriterien kann das sogenannte vorhergesagte mittlere Votum (PMV, engl. Predicted Mean Vote) auf einer 7-stufigen Skala von -3 (zu kalt) bis +3 (zu heiß) eingeordnet werden. Die Kriterien sind die Dämmung der Bekleidung, der Aktivitätsgrad, die Lufttemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur, die Luftfeuchte und die Luftgeschwindigkeit [66]. Darüber hinaus entwickelte Fanger den vorhersagenden Prozentsatz Unzufriedener (PPD, engl. Predicted Percentage Dissatisfied). Dieser ermöglicht eine Einschätzung darüber, wieviel Prozent einer Gruppe es in einem Raum als zu kalt oder zu warm empfinden. [31]

2.1.2 Planungsphasen von Gebäuden

Im Nachfolgenden werden die Planungsphasen von Gebäuden vorgestellt und zunächst die konventionellen Planungsphasen von Gebäuden beschrieben. Darauf aufbauend folgt der Planungsprozess adaptiver Gebäude. Ziel ist es, verschiedene Planungsprozesse und Abläufe voneinander abzugrenzen.

Planungsphasen von konventionellen Gebäuden

In Deutschland orientiert sich die Planung von konventionellen Gebäuden vorwiegend an der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) [68]. Diese umfasst neun Leistungsphasen [68]:

1. Grundlagenermittlung
2. Vorplanung (Vorentwurf)
3. Entwurfsplanung
4. Genehmigungsplanung
5. Ausführungsplanung
6. Vorbereitung der Vergabe
7. Mitwirkung bei der Vergabe
8. Objektüberwachung
9. Objektbetreuung

In der Grundlagenermittlung werden die Rahmenbedingungen des Bauvorhabens formuliert und Fachingenieurinnen integriert. In der Vorplanung und Entwurfsphase findet die Variantenbildung und Konzeptauswahl statt. Ergebnis der Entwurfsphase ist ein Planungskonzept mit definierten Komponenten, welches unter Einbezug aller

Fachingenieurinnen entstanden ist. In der Genehmigungsplanung wird das Planungskonzept zu genehmigungsfähigen Plänen weiterentwickelt und anschließend in der Baubehörde eingereicht. Bei der Ausführungsplanung werden die Pläne soweit verfeinert, dass eine Realisierung des Gebäudes umsetzbar ist. [93] In Phase sechs, der Vorbereitung der Vergabe, folgt die Erstellung der Leistungsbeschreibung und der -verzeichnisse. Diese liefern die Grundlage, um Angebote einzuholen und Baufirmen zu beauftragen. Während der Objektüberwachung erfolgt die Realisierung des Gebäudes [88]. In den ersten fünf Jahren nach der Realisierung des Gebäudes wird dieses noch überwacht und es werden auftretende Mängel behoben [132]. Der große Teil der Nutzungsphase sowie der Rückbau wird in der HOAI nicht mitberücksichtigt [68].

In der Praxis verlaufen die Leistungsphasen der HOAI nicht linear, sondern vielmehr in einem iterativen Ablauf der neun Schritte. Das Vorgehen der HOAI dient grundlegend der Abrechnung monetärer Leistungen entlang des Planungsprozesses. Zu den Stärken der HOAI zählt, dass die Gebührenstruktur leistungsabhängig aufgebaut ist und Aufgaben keinen einzelnen Disziplinen zugeordnet werden. Zudem sind klare Einteilungen vorhanden, welche Aufgaben in welcher Phase abzarbeiten sind und wieviel Geld hierfür zur Verfügung steht. Als Schwäche ist dabei jedoch zu sehen, dass die Schnittstellen und Abstimmungen zwischen den Disziplinen nicht definiert sind. Zudem ist die Leistungsphase fünf sehr umfangreich, da erst hier konkrete Schritte für die Ausführung erarbeitet werden. Ausführende Unternehmen werden erst in der 7. Leistungsphase involviert. [6] Eine Betrachtung von Umweltaspekten findet in der HOAI derzeit nicht standardmäßig statt. Möglich ist es jedoch, Beratungsleistungen für die Bewertung der Umweltwirkungen in den sogenannten besonderen Leistungen einzubeziehen [68]. Darüber hinaus gibt es einige Ansätze, wie Umweltaspekte im Planungsprozess integriert werden können. Diese werden in Kapitel 2.2.1 beschrieben.

International sind einige Ansätze bekannt, die unter anderem versuchen einen früheren Informationsaustausch und bessere Kommunikationsgrundlagen zwischen Fachdisziplinen zu ermöglichen. Dazu zählt unter anderem das Integrated Project Delivery (IPD) [124] des American Institute of Architecture oder der niederländische Bauteamansatz [3]. Das übergeordnete Ziel der Ansätze ist es, bessere Planungsergebnisse hinsichtlich Qualität, Kosten und Zeit zu erreichen. Dazu werden ausführende Unternehmen schon von Beginn an in die Planung mit einbezogen. [3, 124]

Planung von adaptiven Gebäuden

Umfang und Komplexität für die Planung adaptiver Gebäude nehmen im Vergleich zur Planung konventioneller Gebäude zu. Durch die Integration adaptiver Systeme müssen der Planungsprozess und die Planungsinhalte zum einen grundlegend überarbeitet werden und zum anderen müssen neue Fachdisziplinen involviert und die Aufgaben schon agierender Fachdisziplinen angepasst werden. [71, 72] Im Rahmen des SFB 1244 findet erstmals die Entwicklung eines integralen Planungsprozesses adaptiver Gebäude statt. Der entwickelte Planungsprozess hat derzeit den Hauptfokus auf adaptive Tragwerke und außerdem außerhalb des Projekts noch keine Anwendung oder internationale Anerkennung erfahren. Durch die Einzigartigkeit und den nahen Praxisbezug bei der Entwicklung des Planungsprozesses dient dieser dennoch im weiteren Verlauf als Grundlage. [74] Eine ausführliche Herleitung und Darstellung des Planungsprozesses sind in [74] beschrieben.

In Abbildung 9 sind die Planungsphasen eines adaptiven Tragwerkes dargestellt. Auf der linken Seite sind sieben Hauptplanungsphasen definiert. Die ersten vier Phasen beinhalten reine Planungsaufgaben. In der Realisierungsphase ist der Bau des Gebäudes vorgesehen. Anschließend folgt die zeitlich lange Betriebsphase und abschließend das Lebensende, in der das Tragwerk rückgebaut und verwertet wird. In der obersten Zeile sind die sechs verschiedenen Fachdisziplinen zu sehen, die in den einzelnen Planungsphasen iterativ zusammenarbeiten [74]. Im Nachfolgenden wird zuerst der Ablauf des Planungsprozesses beschrieben, bevor die Aufgaben der einzelnen Fachdisziplinen erläutert werden.

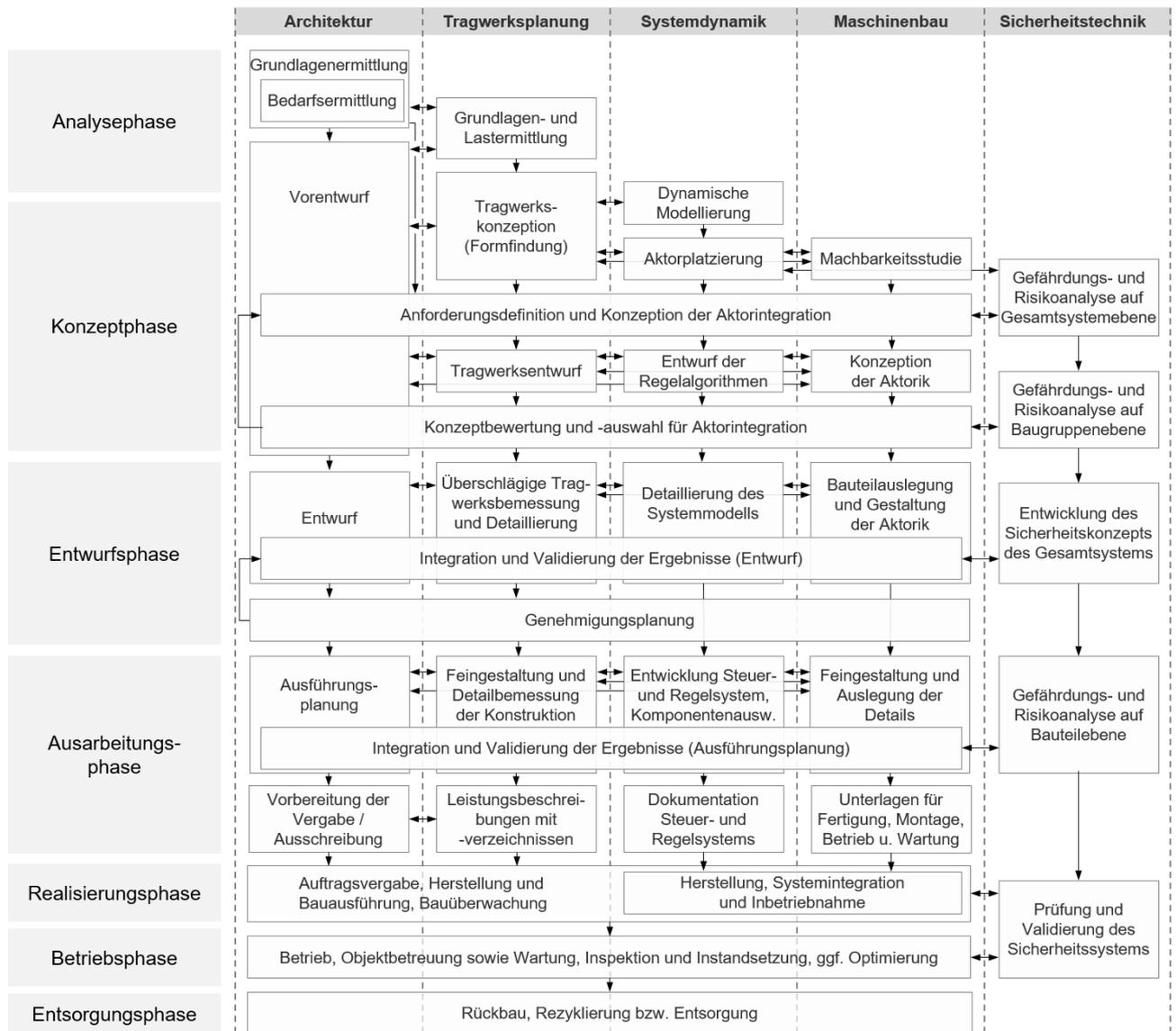


Abbildung 9: Planungsprozess für adaptive Tragwerksysteme in Anlehnung an [74]

Zunächst sind in der Analysephase die Grundlagen des Tragwerks sowie Lastermittlungen vorgesehen. In der anschließenden Konzeptphase werden Vorentwürfe des Tragwerks entwickelt und die adaptiven Systeme entsprechend dafür ausgelegt. Die Vorentwürfe werden in der Entwurfsphase detailliert ausgearbeitet und münden in einer abschließenden Genehmigungsplanung. In der Ausarbeitungsphase findet die Feingestaltung aller Komponenten statt, welche in der anschließenden Realisierungsphase hergestellt und in Betrieb genommen wird. Während der Betriebsphase wird das Tragwerk betreut und instandgehalten. Den Abschluss bilden der Rückbau und die Verwertung der Ressourcen. [74]

Jede der verschiedenen Fachdisziplinen hat im Planungsprozess definierte Aufgaben. Die Vorgehensweisen im Bereich der Architektur orientieren sich an denen der

HOAI. Beginnend mit der Grundlagenermittlung werden durch die Architektur Konzepte und Entwürfe ausgearbeitet, die anschließend detailliert werden. Die Tragwerksplanung untersucht die Lasten, zum Beispiel in Form von Wind, die auf das Tragwerk wirken, so dass das Tragwerk entsprechend darauf ausgelegt werden kann. Die Tragwerksplanung arbeitet dabei iterativ mit der Systemdynamik zusammen. Parallel zur detaillierten Ausarbeitung des Tragwerks werden die Pläne für die Regelalgorithmen und Steuer-/Regelungssysteme erarbeitet. Innerhalb des Maschinenbaus ist eine Machbarkeitsstudie vorgesehen sowie die anschließende Auslegung der Aktorik. Die Sicherheitstechnik erstellt die Sicherheitskonzepte für das Gesamtsystem sowie einzelner Komponenten. [74] Im Vergleich zur HOAI soll im Planungsprozess adaptiver Gebäude die Ökobilanzierung und das Lebensende mitbetrachtet werden [74, 111]. Die zeitliche Integration der Umweltaspekte in den Planungsprozess wurde in [111] erarbeitet und wird in Kapitel 5 beschrieben.

Der vorgestellte Planungsprozess wurde unter anderem anhand der Planung des erläuterten Tragwerks des Demonstrator Hochhauses entwickelt. In den Planungsprozess des adaptiven Tragwerks soll in Zukunft die Planung adaptiver Fassaden integriert werden. Dafür müssen unter anderem Expertinnen der Bauphysik sowie Expertinnen für die Auslegung der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) fachlich und inhaltlich beteiligt werden. [74] Unter Expertinnen werden in dieser Arbeit Personen verstanden, die auf einem Fachgebiet überdurchschnittlich viel Wissen besitzen und dieses auch praktisch anzuwenden wissen. Eine Planerin von Gebäuden kann mit dem entsprechenden Fachwissen auch gleichzeitig Ökobilanzexpertin sein.

2.1.3 Umweltaspekte

Ein Ziel adaptiver Gebäude ist die Reduktion der schädlichen Umweltwirkungen. Im Nachfolgenden werden die Grundlagen von Umweltaspekten und die Quantifizierung von Umweltwirkungen durch die Methode der Ökobilanz beschrieben. Abschließender Inhalt sind die Besonderheiten der Ökobilanz im Bauwesen.

Der Begriff Umweltaspekt kommt aus dem Bereich des Umweltmanagements und ist definiert als ein „Bestandteil der Tätigkeit oder Produkte oder Dienstleistung einer Organisation, der auf die Umwelt einwirken kann“ [28]. Umweltaspekte adaptiver Gebäude stellen damit die Bestandteile der adaptiven Gebäude dar, die auf die Umwelt einwirken können. Diese Umweltaspekte müssen ermittelt werden, um bedeutende Umweltwirkungen adaptiver Gebäude sowie ihrer Komponenten identifizieren zu können [28, 29].

Methode der Ökobilanz

Eine Möglichkeit die Umweltwirkungen zu quantifizieren, stellt die Ökobilanzierung (LCA, engl. Life Cycle Assessment) dar. Die Ökobilanz ist eine international anerkannte Methode und wurde in der DIN EN 14040 [29] und 14044 [30] standardisiert. Darin ist diese definiert als eine Methode zur Quantifizierung von Umweltwirkungen des gesamten Lebenszyklus eines Produktes, Prozesses oder einer Dienstleistung. Der gesamte Lebenszyklus erstreckt sich dabei vom Rohstoffabbau bis hin zum Lebensende (siehe Abbildung 10). [29, 30]

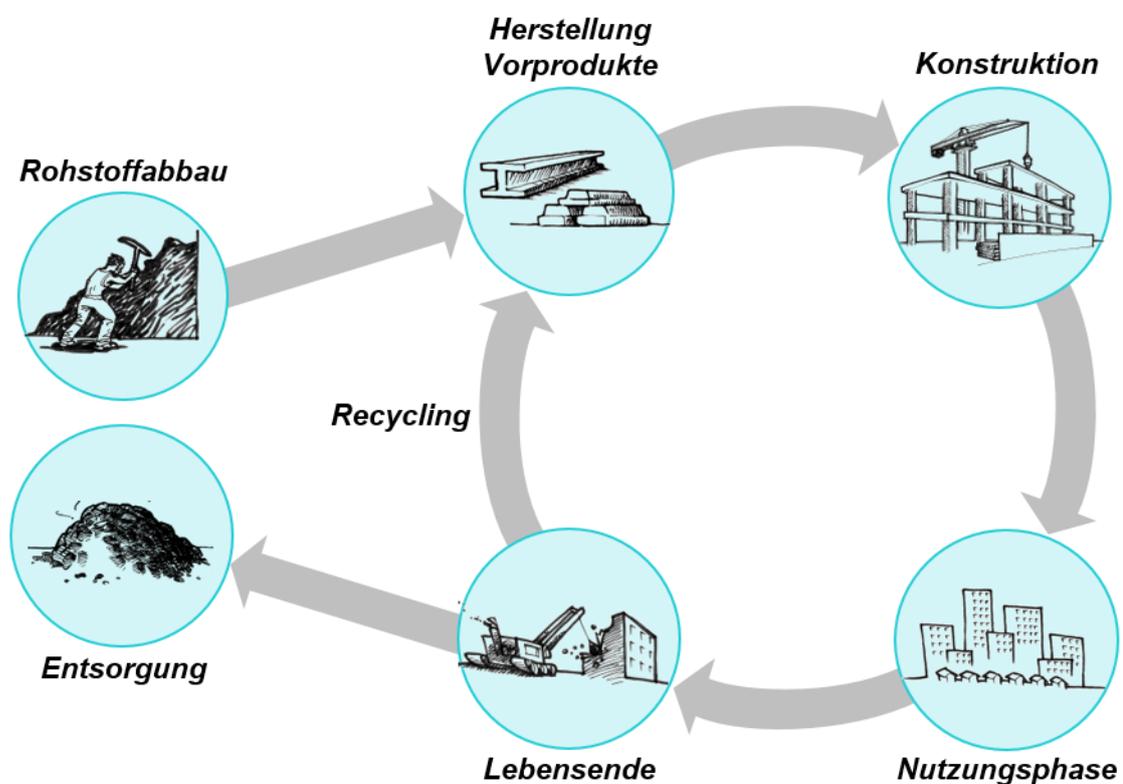


Abbildung 10: Lebenszyklus von Produktsystemen in Anlehnung an [29, 92]

Die Anwendung der Ökobilanz baut auf fünf verschiedene Phasen auf [29]:

- 1) Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- 2) Sachbilanz

- 3) Wirkungsabschätzung
- 4) Auswertung
- 5) Direkte Anwendung

Im ersten Schritt werden unter anderem das zu untersuchende System (Produktsystem), die Systemgrenze und die funktionelle Einheit definiert. Grundlegend dient die funktionelle Einheit dazu, eine quantifizierbare Bezugsgröße des Produktsystems für Input- und Outputflüsse zu schaffen. Dadurch sind eine Vergleichbarkeit und damit ein Variantenvergleich von beispielsweise verschiedenen adaptiven Tragwerken möglich. In der Sachbilanz findet die Datenerhebung und Datenberechnung statt. Dazu werden alle Inputs und Outputs des Produktsystems über den gesamten Lebensweg quantifiziert. Die Sachbilanzdaten werden anschließend mit den Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren verknüpft. Ziel ist es, die potenziellen Umweltwirkungen zu identifizieren. Die Auswertung untersucht die Ergebnisse der vorherigen Schritte entsprechend des festgelegten Ziels. Die direkte Anwendung ist als optionaler Schritt zu sehen. Hier werden die Ökobilanzergebnisse genutzt, indem zum Beispiel adaptive Systeme hinsichtlich der Reduktion der schädlicheren Umweltwirkungen weiterentwickelt werden. Darüber hinaus besitzt die Ökobilanz ein iteratives Vorgehen, so dass zum Beispiel während der Auswertung nochmals Sachbilanzdaten angepasst werden können. [29, 30, 84] Dies ist in der alltäglichen Anwendung von Ökobilanzen sehr bedeutsam, um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu gelangen.

Ökobilanzierung im Bauwesen

Die Anwendung der Ökobilanz auf Gebäudeebene bringt im Vergleich zu anderen Produktsystemen einige Besonderheiten mit sich, welche vor allem in der DIN EN 15978 [26] zusammengefasst sind. Für einzelne Bauprodukte ist zudem die DIN EN 15804 [25] für Umweltproduktdeklarationen (EPD, engl. Environmental Product Declaration) zu beachten. Im Forschungsvorhaben „Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy Efficient Buildings Initiative“ (EeBGuide) [47, 48] wurde darüber hinaus ein Leitfaden für die Erstellung von Ökobilanzen im Bauwesen entwickelt. Dieser bietet Hilfestellungen zur Modellierung von energieeffizienten Gebäuden und Bauprodukten. [47, 48] Mit Level(s) wurde 2017 zudem ein EU-Rahmen veröffentlicht, der Nachhaltigkeitsindikatoren für Büro- und Wohngebäude formuliert, die besonders ökologische, aber auch weitere Leistungsaspekte, wie die Gesundheit, erfassen [33, 34]. Zertifizierungssysteme von Gebäuden wie das der Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB) [23] oder das

Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) [13] gelten als Bewertungsgrundlage der Ökobilanzen, ebenso die DIN EN 15978. Zertifizierungssysteme von Gebäuden vergeben Zertifizierungssiegel hinsichtlich der Nachhaltigkeit von Gebäuden. Die Nachhaltigkeitsperformance wird bei der DGNB [23] und BNB [64] auf Basis verschiedener gewichteter Kriterien berechnet und bewertet. Die Kriterien ermöglichen die Bewertung der ökologischen, ökonomischen, technischen, soziokulturellen und funktionalen Qualität sowie Prozess- und Standortqualität [64, 23]. Die wichtigsten Besonderheiten von Ökobilanzen im Bauwesen werden nachfolgend zusammengefasst.

Der Lebenszyklus für Gebäude und seine Bauprodukte ist in Abbildung 11 veranschaulicht.

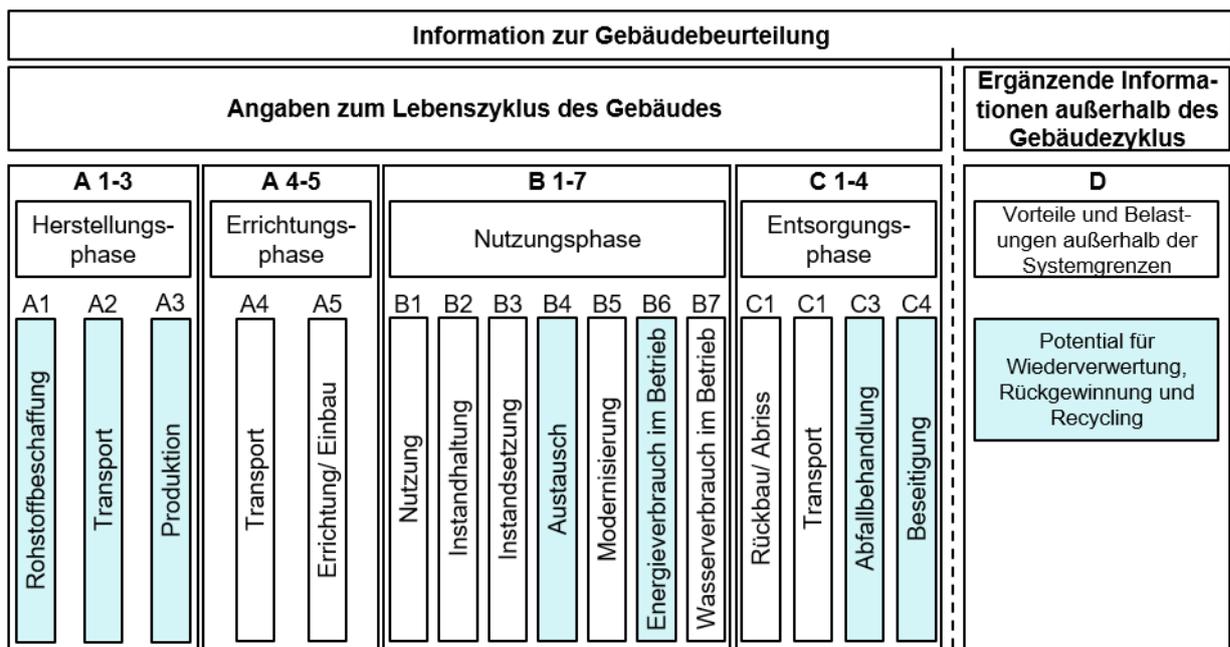


Abbildung 11: Lebenszyklus von Gebäuden in Anlehnung an [26]

Modul A teilt sich auf in die Herstellungsphase (A1 bis A3) und die Errichtungsphase (A4 bis A5). Die verhältnismäßig lange Nutzungsphase von Gebäuden und Bauprodukten ist in B1 bis B7 gesplittet. Dabei ist besonders der Energieverbrauch im Betrieb (B6) hervorzuheben, da hier durch das Heizen, Lüften und Kühlen hohe Umweltwirkungen entstehen. Während der Phase des Lebensendes ist der Rückbau des Gebäudes bis hin zur Beseitigung (C1 bis C4) vorgesehen. Ergänzend können die Vorteile und Belastungen beachtet werden, also die Gutschriften, die dem System durch beispielweise Recycling zugeführt werden (D). [26] Die im Lebenszyklus

in blau hervorgehobenen Lebenszyklusphasen, sind die Phasen die bei der DGNB aktuell für Zertifizierungen verpflichtend erfasst werden [23]. Dieser Fokus ergibt sich, da die hervorgehobenen Lebenszyklusphasen in der Regel die meisten Umweltwirkungen im Lebenszyklus eines Gebäudes erbringen [18, 58, 97].

Ökobilanzen werden in der Regel mit spezifischen Softwaresystemen berechnet. Für die Erstellung von klassischen Produktökobilanzen werden beispielsweise die Software Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi) [126] oder openLCA [54] genutzt. Spezielle Softwarelösungen für Ökobilanzen von Gebäuden und Bauprodukten sind zum Beispiel Generis [43] in Deutschland oder LCAByg [8] in Dänemark. Ein Beispiel für bauspezifische Datenbanken sind die ÖKOBAUDAT des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI) [12] und die Europäische Datenbank für nachhaltiges Bauen (ESUCO, engl. European Sustainable Construction Database) der DGNB [22].

Unsicherheiten in der Ökobilanz von Gebäuden

Eine unsichere Datenlage und das Nutzen von Szenarien spielen im Bereich der Gebäudeökobilanz eine besondere Rolle. Wegen des langen Lebenszyklus der Gebäude müssen viele Annahmen zu Materialmengen, Nutzerinnenverhalten und äußeren Einflüssen getroffen werden. [94]

Unsicherheiten in der Ökobilanz können unabhängig vom Produktsystem in epistemische und stochastische, synonym auch aleatorische, Unsicherheiten aufgeteilt werden [19, 76, 90]. Epistemische Unsicherheit entsteht zum Beispiel durch (Mess-)Fehler oder mangelndes Wissen. Dies ist unter anderem durch Forschung oder Einbezug von Stakeholderinnen zu reduzieren. Stochastische Unsicherheiten werden durch Variabilität, also die in der Natur vorkommende Variation, erzeugt und sind daher unvermeidbar. [19, 90, 75] Diese Unsicherheiten können unter anderem mit statistischen Methoden bearbeitet werden, was zwar die Unsicherheit nicht verringert, aber einen Umgang damit bietet [40]. Nachfolgend werden die wichtigsten Möglichkeiten im Umgang mit Unsicherheiten in der Gebäudeökobilanz beschrieben. Diese sind nicht alle klar voneinander zu trennen, sondern können teilweise kombiniert werden.

Um mit Unsicherheiten umzugehen, besteht die Möglichkeit, verschiedene Szenarien aufzustellen und zu berechnen. Dazu werden verschiedene Datensätze, Modelle oder Wahlmöglichkeiten definiert und auf ihre Konsequenzen in der Ökobilanz

untersucht. Ein Beispiel ist die Formulierung verschiedener Lebensendeszenarien von Gebäuden oder auch ein Worst Case und Best Case Szenario bezüglich der Aktuierungshäufigkeit adaptiver Systeme in der Nutzungsphase. Eine weitere Möglichkeit mit Unsicherheiten umzugehen stellt die Parametervariation, oder auch Sensitivitätsanalyse genannt, dar. Bei der Veränderung eines einzelnen Parameters wird die dadurch entstehende Veränderung der Ökobilanzergebnisse untersucht. [65] Eine Abwandlung davon ist die Key Issue Analyse. In dieser wird geprüft, inwiefern Parameter zum einen unsicher sind und darüber hinaus Sensitivitäten aufweisen. Wenn ein Parameter sowohl unsicher als auch sensitiv ist, sollte dieser weiter analysiert werden. Ist ein Parameter unsicher, aber nicht sensitiv, sind weitere Untersuchungen des Parameters häufig nicht nötig, da dieser kaum Einfluss auf die Ergebnisse nimmt. [62]

Eine weitere Möglichkeit ist die Untersuchung der Wahrscheinlichkeiten von Parametern oder zuvor festgelegter Szenarien. Infolgedessen können statistische Auswertungen des Dateninputs sowie der Ökobilanzergebnisse erfolgen. [40] Die Zuordnung von Wahrscheinlichkeiten kann zudem noch etwas aufwändiger untersucht werden. Dazu eignen sich sogenannte Sampling Methoden oder auch numerische Methoden. Ein Beispiel hierfür ist die Monte Carlo Simulation. [65]

Eine Methode, die einige der genannten Möglichkeiten kombiniert, ist die Wahrscheinlichkeitsbasierte dynamische LCA (P-LCA, engl. Probabilistic LCA). Auf Basis von zeit-dynamischen Sachbilanzen werden die Unsicherheiten durch Szenarien und Eintrittswahrscheinlichkeiten abgebildet. Dadurch wird aufgezeigt, wie die Ergebnisse auf Grundlage der ausgewählten Parameter streuen. [49]

2.1.4 Komplexe Systeme

Adaptive Gebäude und deren Planungsprozess stellen ein komplexes System dar. Für die Integration von Umweltaspekten ist es wichtig, dieses als Ganzes zu verstehen und Zusammenhänge zu berücksichtigen. Nachfolgend wird daher zuerst eine Einführung in die Thematik gegeben und die Herausforderungen der komplexen Systeme werden adressiert. Im Anschluss werden Werkzeuge für die Erfassung komplexer Systeme und deren Umgang beschrieben.

Komplexe Systeme unterscheiden sich von komplizierten Systemen [129]. Ein kompliziertes System hat verknüpfte Einflussfaktoren in einem stabilen System mit geringer Dynamik [53]. Einflussfaktoren sind variable Knotenpunkte eines Systems, deren dynamische Ordnung zu einem Wirkungsgefüge führt [129]. Das komplizierte

System ist greifbar [53], quantifizierbar und beherrschbar [130]. Die Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen in einem komplexen System ändern sich laufend, so dass eine permanente Dynamik mit fortlaufend neuen Mustern entsteht. Einflussfaktoren in komplexen Systemen sollten nicht isoliert voneinander betrachtet werden, sondern als ganzheitliche und vernetzte Systeme. [53] Durch die Verflechtung der Einflussfaktoren zu Wirkungsgefügen entsteht im System eine vielschichtige Struktur [32]. Einflussfaktoren in komplexen Systemen sollten miteinander in Verbindung gesetzt werden, um zu verstehen, wie diese aufeinander reagieren und zusammenhängen [129]. Abläufe und Zustände im System müssen beherrschbar sein, um diese weiterentwickeln zu können [1, 114].

Im Umgang mit komplexen Systemen sind immer wiederkehrende Fehler zu beobachten. Häufig werden komplexe Systeme erst gar nicht als komplexe Systeme eingestuft und stattdessen intuitive Entscheidungen getroffen. [45, 53] Wenn mit komplexen Systemen umgegangen wird, gelten als häufige Fehlerquellen: Eine falsche Zielsetzung, eine sektorale Betrachtungsweise, die Angst vor Komplexität und weichen Daten, die Auswahl der Daten und falsche Prognosen durch den Fokus auf die Kurzfristigkeit. [2, 129] Somit werden die Auswirkungen des eigenen Handelns nicht erkannt oder verstanden [103]. Falsche Prognosen befördern Schlüsse für eine Problemlösung, die das tatsächliche Problem nicht lösen [129]. Für die Entlastung von Straßen und Parkplätze in Städten hilft es zum Beispiel nicht unbedingt, diese zu erweitern, da dadurch lediglich noch mehr Verkehr entsteht [85]. In der Regel werden komplexe Systeme nicht ausreichend von einer Makroperspektive betrachtet, die zwingend nötig ist, um Systeme tatsächlich zu verbessern [91].

Systemtheorie als Umgang mit komplexen Systemen

Eine Möglichkeit, diese Fehler zu umgehen und ein System mit oder auch trotz seiner Komplexität zu erfassen, ist die Systemtheorie, die auch vernetztes Denken genannt wird. Diese lenkt den Blick auf die Nachteile der ungesesehenen Wechselwirkungen und Verhaltensänderungen. Zielkonflikte lassen sich aufarbeiten und verbessern. Maßnahmen können entwickelt werden, um besser zu steuern. [41]

Die Abfolge der Vorgehensweise der Systemtheorie ist in der Literatur jeweils leicht verschieden. Zusammengefasst ergeben sich die nachfolgenden vier Schritte, die im Anschluss beschrieben werden [32, 41, 53, 55, 86, 91, 103, 129]:

I. Systembeschreibung

- II. Erfassung der Einflussfaktoren
- III. Untersuchung der Zusammenhänge und Wechselwirkungen
- IV. Interpretation und Ableiten von Handlungsempfehlungen

I. Systembeschreibung

In einem ersten Schritt sind eine Systemabgrenzung und Systembeschreibung vorgesehen. Dies ist von Bedeutung, um das Ziel der Untersuchung und damit den Handlungsrahmen festzulegen. Die Systembeschreibung ist die Basis für die nachfolgenden Schritte. [53, 129]

II. Erfassung der Einflussfaktoren:

Im zweiten Schritt werden alle wesentlichen Einflussfaktoren identifiziert. Die Anzahl an Einflussfaktoren soll etwa zwischen 20 bis 40 Stück liegen. Bei einer höheren Anzahl an Einflussfaktoren sind der nötige Überblick und die Handhabbarkeit nicht mehr gegeben. Je vielseitiger ein Einflussfaktor ist, also je mehr Kriterien unter diesen fallen, desto weniger Einflussfaktoren werden benötigt. Möglichkeiten zur Erfassung der Einflussfaktoren sind Expertinnenbefragungen, Literaturrecherchen wie auch die Befragung verschiedener Stakeholderinnen zum Beispiel in Form eines Brainstormings. [129] Eine weitere Möglichkeit stellt die Definition von Teilgründen/-zwecken des Systems dar, aus denen dann Einflussfaktoren abgeleitet werden können [53]. Teilzweck eines Gebäudes ist zum Beispiel die Tragfähigkeit, woraus unter anderem der Einflussfaktor der Statik abgeleitet werden kann.

III. Wechselwirkungen untersuchen:

Um ein System umfassend zu verstehen, sind die Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren zu erfassen [129]. Dazu werden die Einflussfaktoren im dritten Schritt auf ihre Wechselwirkungen untersucht. Für die Untersuchung der Wechselwirkungen gibt es vielfältige Möglichkeiten, wovon im Nachfolgenden die gängigsten beschrieben werden.

Eine Möglichkeit, die Wechselwirkungen zu ermitteln, ist eine Einflussmatrix. In ihr werden die verschiedenen Einflussfaktoren paarweise gegenübergestellt und auf beidseitige Wechselwirkungen untersucht. [104, 129] In Abbildung 12 ist die Einflussmatrix beispielhaft mit drei Einflussfaktoren (A, B, C) dargestellt die in den zwischenliegenden Quadranten auf ihre gegenseitigen Wechselwirkungen bewertet werden.

	A	B	C	Σ
A				Aktivsumme
B				
C				
Σ	Passivsumme			

Abbildung 12: Funktionsprinzip der Einflussmatrix in Anlehnung an [86]

Für die Bewertung des blauen Feldes wird im Beispiel von Abbildung 12 nachfolgende Ausgangsfrage gestellt:

Wird Element C verändert, wie stark verändert sich dann – ganz gleich in welche Richtung – durch direkte Einwirkung von C das Element A? [129]

Für jede Wechselwirkung stellen nachfolgende Bewertungen eine Auswahl [129]:

- 0:** Keine Beziehung (gar keine, sehr schwache Einwirkung)
- 1:** Schwache Beziehung (schwache Einwirkung)
- 2:** Proportionale Beziehung (bei einer Veränderung von C entsteht eine gleich starke Veränderung von A)
- 3:** Starke, überproportionale Beziehung (bei einer geringen Veränderung von C entsteht eine starke Veränderung von A)

Aus dieser Bewertung können, wie in Abbildung 12 zu sehen ist, Aktiv- und Passivsummen gebildet werden [104]. Die Aktivsumme stellt die Summe einer Spalte dar und damit, wie stark ein Einflussfaktor insgesamt auf andere Einflussfaktoren wirkt. Eine Passivsumme, die Summe einer Zeile, bildet im Umkehrschluss ab, wie stark der Einflussfaktor von anderen beeinflusst wird. [129]

Die Aktiv- und Passivsummen können im Anschluss genutzt werden, um ein Systemgrid darzustellen [104]. Das Schema des Systemgrids ist in Abbildung 13 dargestellt.

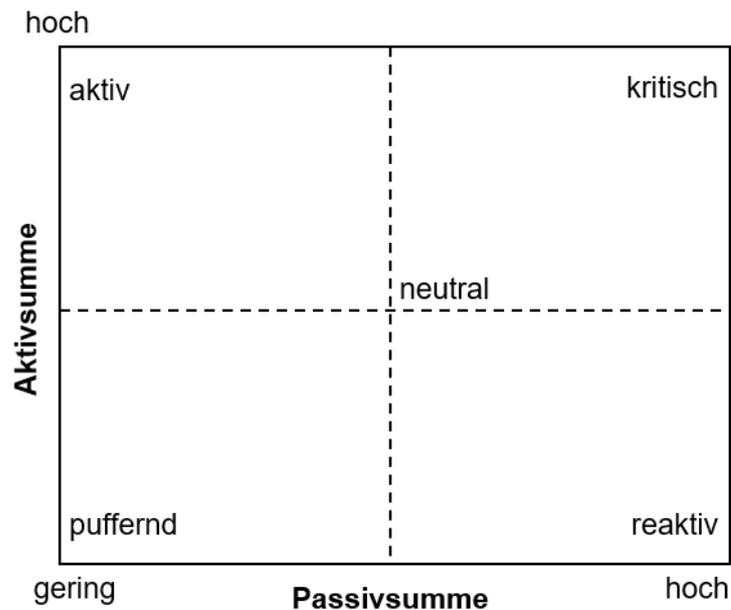


Abbildung 13: Funktionsprinzip des Systemgrids in Anlehnung an [104, 129]

Mit Hilfe des Systemgrids können den Einflussfaktoren fünf verschiedene Rollen zugeordnet werden. Hieraus ist zu erkennen, welche Einflussfaktoren beispielsweise eher reaktiv und dadurch als „Messfühler“ geeignet sind. Messfühler ermöglichen eine Bewertung des Systems und können beispielsweise Kosten sein. Kritische Einflussfaktoren werden dagegen stark beeinflusst und beeinflussen stark. Aktive Einflussfaktoren sind häufig Rahmenbedingungen im System wie zum Beispiel Gesetze. Die Veränderung von puffernden Einflussfaktoren hat meistens keine große Einwirkung auf das restliche System. Neutrale Einflussfaktoren werden aus dem Durchschnitt der Aktiv- und Passivsummen gebildet und haben eine moderate Wechselwirkung mit dem System [104, 129].

Neben dem Systemgrid können die Wechselwirkungen auf bestehende Regelkreise untersucht werden [129]. Diese lassen sich in verstärkende und stabilisierende Regelkreise aufteilen und sind exemplarisch in Abbildung 14 dargestellt [53].

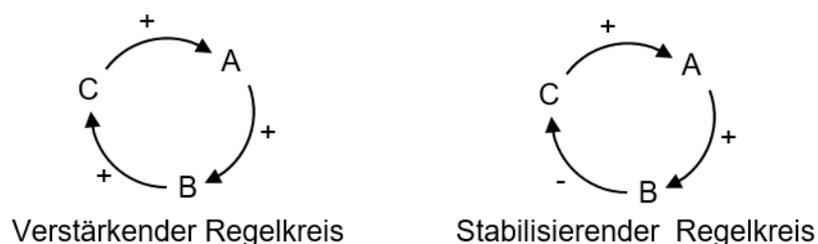


Abbildung 14: Mögliche Regelkreise in Systemen in Anlehnung an [53, 129]

In verstärkenden Regelkreisen treiben sich Einflussfaktoren gegenseitig immer weiter an [53]. Beispielsweise ergibt, vereinfacht dargestellt, ein Mehr an Tomatenpflanzensamen auch ein Mehr an Tomaten und dadurch wächst die Zahl der Tomatenpflanzensamen. Der stabilisierende Regelkreis kommt einem funktionierenden Ökosystem gleich. Durch die zwei Zeichen Plus und Minus wird die Wirkung einer Beziehung beschrieben. Das Plus stellt eine verstärkende Wirkung und das Minus die Dämpfung und Stabilisierung dar. In Regelkreisen können zudem zeitliche Abhängigkeiten integriert werden. Dies spiegelt wider, inwieweit die Wirkung von Einflussfaktor A auf B direkt einsetzt oder erst mittel- oder langfristig eine Einwirkung erfolgt. [53, 129] Beispielsweise liegen zwischen dem Säen von Samen und dem Ernten von Gemüse einige Monate.

Im dritten Schritt der Systemtheorie können die Einflussfaktoren zudem darauf hin untersucht werden, ob diese direkt lenkbar oder nicht lenkbar sind. Nicht lenkbare Einflussfaktoren sind häufig auch aktive Einflussfaktoren und können als Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel Gesetze, verstanden werden. Durch lenkbare Einflussfaktoren sind gewünschte Veränderungen zielgerichtet zu erreichen. [53, 129] Wenn Einflussfaktoren weder lenkbar noch nicht lenkbar sind, werden diese Indikatoren genannt. Indikatoren verändern sich durch die Anpassung der lenkbaren Einflussfaktoren. Zum Beispiel wird durch die Anzahl an Sonnenstunden (nicht lenkbarer Einflussfaktor) und durch die Wassermenge (lenkbarer Einflussfaktor) die an die Tomatenpflanze gegeben wird, die Anzahl an reifen roten Tomaten (Indikator) beeinflusst.

IV. Interpretation und Handlungsempfehlungen

Die Untersuchung der Wechselwirkungen ermöglicht ein umfassendes Systemverständnis. Auf Basis dieses Systemverständnisses können im Anschluss die Ergebnisse entsprechend der Zielstellung interpretiert werden. Als Ergebnis lassen sich zum Beispiel Charakterisierungen, Beschreibungen von Handlungsempfehlungen und Maßnahmen erarbeiten. [114]

2.2 Stand der Forschung

In diesem Teilkapitel wird ein Überblick über die bestehenden Ansätze, Methoden und Werkzeuge gegeben, welche die Umweltaspekte in Planungsphasen von adaptiven und konventionellen Gebäuden abschätzen. Darüber hinaus werden Studien

analysiert, die Bauprojekte systematisch auf ihre Komplexität untersucht haben. Die verschiedenen Arbeiten werden vorgestellt und hinsichtlich des Ziels und des Schwerpunkts dieser Arbeit diskutiert sowie Lücken aufgedeckt.

2.2.1 Umweltaspekte in Planungsphasen von Gebäuden

Am effektivsten können schädliche Umweltwirkungen von Gebäuden schon in deren frühen Planungsphasen minimiert werden. In diesem Zeitraum werden die meisten Entscheidungen getroffen, welche dann für die Umwelt positive oder negative Folgeerscheinungen bringen. [10, 23] Die Ökobilanz hat sich als geeignete Methode herausgestellt, Umweltwirkungen in Planungsprozessen von Gebäuden und deren Komponenten zu bewerten [21].

Zunehmend wird versucht, die Ökobilanz in Planungsphasen von konventionellen Gebäuden zu integrieren. Hierfür wird häufig auf Benchmarks zurückgegriffen. In der Literatur und bei Zertifizierungssystemen existieren im Kontext des ökologischen Bauwesens verschiedene Definitionen, Anwendungsbereiche und Arten von Benchmarks. Das Technische Forschungszentrum Finnland (VTT) [59] definiert zum Beispiel vier verschiedene Typen von Benchmarks. Der erste Typ ist der Zielwert (engl. Target Value). Dieser ist der theoretisch höchstmögliche erreichbare Wert und kann zum Beispiel das technische Optimum darstellen. Als bestmöglicher Wert (engl. Best-Practise Value) ist der zweite Typ definiert, der zum Beispiel in Experimenten erreicht werden kann. Der dritte Typ stellt den regulären Wert (engl. Regular Value) dar, also den Stand der Technik. Am Schluss befindet sich der Grenzwert (engl. Limit Value) für die Untergrenze an akzeptablen Werten. [59] Eine in der Literatur häufig dargestellte Aufteilung für die Verwendung von Benchmarks für Planungsphasen konventioneller Gebäude ist die Aufteilung in Bottom-Up und Top-Down Ansätze, die in Abbildung 15 schematisch dargestellt ist.

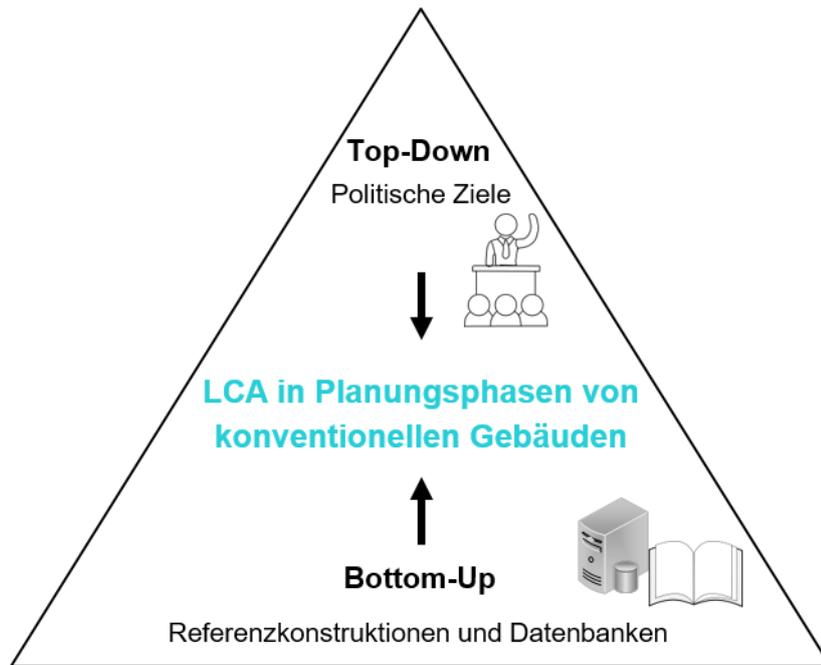


Abbildung 15: Benchmarks als Instrument für die Integration von Ökobilanzen in Planungsphasen von konventionellen Gebäuden

Top-Down Benchmarks stellen politische Ziele, wie das des 1,5°C Ziels des Pariser Klimaabkommens dar [69]. Die politischen Ziele werden für die Anwendung der Benchmarks auf gebäudespezifische Ziele übertragen [59]. Ein Beispiel des schweizerischen ingenieur- und architektenverein (sia) ist der sia-effizienzpfad energie. Dieser hat Zielwerte für die Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor formuliert. [115] Basis dafür ist die energiepolitische Vision der 2000-Watt-Gesellschaft, welche besagt, dass der Energiebedarf jeder Erdenbewohnerin nicht mehr als 2000 Watt betragen darf. [39]

Der Bottom-Up Ansatz ist der in der Literatur am meisten angewendete Ansatz für die Integration von Benchmarks in Planungsphasen. Bei diesem werden die Benchmarks aus theoretischen Werten abgeleitet, zum Beispiel aus der Technik und Ökonomie. [69] Eine Herangehensweise für Bottom-Up Ansätze basiert auf Referenzkonstruktionen. Durch berechnete Umweltwirkungen von Referenzkonstruktionen kann eine stringente und konsistente Datenbank entwickelt werden und als Grundlage für Benchmarks dienen. [51] Für eine softwareseitige Anwendung dieser Benchmarks ist es möglich, Softwaresysteme für die Modellierung von Bauwerken und Softwaresysteme für die Erstellung von Ökobilanzen zu kombinieren. Dieser Ansatz wird unter anderem in dem Projekt Building Information Modeling (BIM) -basierte Integrale Planung (BIM2LCA4IP) [81] umgesetzt. BIM ist eine Möglichkeit zur digitalen, semantischen Gebäudemodellierung [99]. Die Grundidee des Projekts ist es,

die Materialien und entworfene Komponenten direkt mit Ökobilanzergebnissen zu verknüpfen. Dadurch lassen sich direkt – während der Modellierung von Gebäuden – Umweltwirkungen in Form von Benchmarks mitbeachten. [36] Eine andere Herangehensweise für Bottom-Up Ansätze ist die Verwendung bestehender Datenbanken von Gebäuden. Allerdings ist eine derart umfassende und aufbereitete Datenbasis wegen der Neuartigkeit von Ökobilanzen im Bauwesen noch nicht vorhanden. Zertifizierungssysteme wie die DGNB [23] oder BREEAM [11] besitzen jedoch grundsätzlich die notwendige Datengrundlage, jedoch nicht in gewünschter Struktur und Einheitlichkeit. [112]

Für die Adressierung der Umweltwirkungen von Gebäuden müssen verschiedene Zeitpunkte und -räume im Planungsprozess oder verschiedene Detaillierungsebenen der Ökobilanz definiert werden. Diese sind unter anderem von der geeigneten Datengrundlage oder der gewünschten Detaillierung der Ökobilanz abhängig. Im EeBGuide werden drei Detaillierungsebenen vorgeschlagen. Die erste Detaillierungsebene stellt ein grobes Screening an Umweltwirkungen dar. Anschließend folgt eine vereinfachte Ökobilanz (engl. Simplified LCA) und zuletzt eine vollständige Berechnung der Ökobilanz (engl. Complete LCA). [48] Das BNB-System definiert zwei verschiedene Detaillierungsebenen (Screening und vollständige LCA) [14]. Im Projekt BIM2LCA4IP sind vier Zeitpunkte vorgesehen, um über Benchmarks ökobilanzielle Ergebnisse im Planungsprozess einzubeziehen. Die ersten beiden Zeitpunkte sind zum einen direkt zu Beginn der Planung auf Basis des Gebäudesystems und zum anderen nach der Bedarfsplanung und Grundkonzeption. Die fertigen Entwürfe bilden die Grundlage für den dritten Zeitpunkt, in dem Benchmarks auf Basis von einzelnen Elementen angewendet werden. Der letzte Zeitpunkt ist nach der Ausführungsplanung und differenziert sich bis zu den einzelnen Schichten der Elemente. [51]

Für die Integration der Umweltaspekte in den Planungsprozess von Gebäuden bestehen derzeit noch einige Herausforderungen. Eine ist die bereits beschriebene unsichere Datengrundlage der Ökobilanzen von Gebäuden. Des Weiteren werden Gebäude in der Regel als Unikate gebaut, die zumeist nicht noch einmal auf dieselbe Weise realisiert werden. Standardisierte Modellierungen, wie zum Beispiel über Benchmarks, sind daher nicht immer umsetzbar. [15, 128] Um darüber hinaus belastbare und aussagekräftige Ökobilanzen zu erstellen, ist es notwendig, ein fundiertes Expertinnenwissen zu besitzen [101, 107]. Daher werden Ökobilanzen von

Gebäuden in der Regel durch Expertinnen der Ökobilanz und nicht durch Expertinnen des Bauwesens durchgeführt [105, 110]. Darüber hinaus sind Ökobilanzen vor allem im Schritt der Datenerfassung sehr zeitintensiv [101, 107]. In der Praxis werden aufgrund dieser Herausforderungen häufig noch keine Ökobilanzen in der Planung berücksichtigt und allenfalls auf die Umweltwirkungen in der Nutzungsphase geachtet. [50]

2.2.2 Umweltaspekte in Planungsphasen von adaptiven Gebäuden

Bislang liegt keine systematische Betrachtung von Umweltaspekten in den Planungsphasen adaptiver Tragwerke vor. Battisti, Crepsi und Persiani forschen als Einzige an der Integration der Ökobilanz in frühen Planungsphasen adaptiver Fassaden [4, 20, 21].

Bei deren ersten ausführlichen Untersuchung [4, 20] werden adaptive Systeme als passive adaptive Systeme, also adaptive Materialien, verstanden. Diese sogenannten Null Energie Technologien (engl. Zero Energy Technologies) haben vor allem das Ziel Einsparungen von schädlichen Umweltwirkungen im Bereich des Betriebs zu erreichen [4]. Durch die Integration der adaptiven Materialien wird eine Verschiebung der schädlichen Umweltwirkungen von der Nutzungsphase in die Herstellungsphase, den Austausch und das Lebensende erwartet. Für die Beachtung der Ökobilanz im Planungsprozess adaptiver Fassaden wird von Crepsi et al. ein Werkzeug entwickelt. Dafür sind zum einen Parameter identifiziert und analysiert worden, die für das Entwerfen von passiven adaptiven Systemen notwendig sind. [20] Zum anderen wurden Materialien, Prozesse und Konzepte für den Entwurf adaptiver Fassaden identifiziert sowie Handlungsempfehlungen für die Optimierung des Entwurfs und deren Produktion formuliert [4]. Dieses Werkzeug wird bislang mit keinem konkreten Planungsprozess verknüpft.

In einer weiteren Untersuchung von Crepsi und Persiani [21] werden darüber hinaus auch aktive adaptive Systeme in Fassaden durch eine Literaturrecherche analysiert. Diese Untersuchung beantwortet verschiedene Leitfragen, beispielsweise zur Funktionsfähigkeit der Adaptivität. Eine Hauptidee ist die Notwendigkeit, neue dynamische Simulationen zu entwickeln, die die Energieaufwendungen adaptiver Systeme für die Lebenszyklusphase B6 abschätzen. Neben der zusätzlichen Integration der neuen Inputgrößen durch adaptive Systeme werden keine signifikanten Veränderungen für die Ökobilanz erwartet. Crepsi und Persiani schlagen die Ökobilanz als Werkzeug vor, um zukünftige Entwürfe adaptiver Gebäudehüllen zu optimieren.

Dafür müssen jedoch unter anderem neue und größere Wissensdatenbanken für zukünftige Entwicklungen erarbeitet und eine Verknüpfung mit BIM ermöglicht werden. [21] Die Untersuchung bietet lediglich eine thematische Annäherung an aktiv adaptive Fassaden im Kontext der Ökobilanz an, weist aber noch keine konkreten Ansätze oder Werkzeuge auf, die im Umgang der Abschätzung von Umweltwirkungen im Planungsprozess genutzt werden können.

2.2.3 Anwendung der Systemtheorie im Bauwesen

Zwei Systemuntersuchungen aus dem Bereich des Bauwesens mit dem Fokus auf die Ökologie werden in deinem Abschnitt vorgestellt. Diese werden auf Basis der Sensitivitätsanalyse nach Vester [129] durchgeführt.

Hafner [57] verfolgt in ihrer Arbeit die Frage, ob es einen Zusammenhang zwischen der (Bau-)Qualität und Nachhaltigkeit von Gebäuden gibt und wenn ja, wie dieser aussieht. Sie führt eine umfassende Systemanalyse zu den Aspekten der Nachhaltigkeit und den Kriterien der (Bau-)Qualität durch. Dabei geht der Untersuchungsrahmen von der Planung bis zum Lebensende konventioneller Gebäude. Das Ergebnis sind konkrete Erkenntnisse und Maßnahmen, die in zukünftige Planungsprozesse integriert werden sollten, um qualitativere und nachhaltigere Gebäude zu bauen. Dass Kosten über den gesamten Lebenszyklus berechnet werden sollten und dass die Ausführung des Baus überwacht werden sollte, um eine Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten zu stärken, sind beispielsweise Erkenntnisse und Maßnahmen aus ihrer Untersuchung. [57]

Anders [2] untersucht in seiner Arbeit die Frage, wie der Entscheidungsfindungsprozess in frühen Planungsphasen konventioneller Gebäude unterstützt werden kann. Das System umfasst dabei nicht nur ein Gebäude, sondern ein gesamtes Stadtquartier über den gesamten Lebenszyklus. Anders formuliert einige Erkenntnisse in Bezug auf seine Systemuntersuchung. Jedoch kommt er zu dem Schluss, dass seine Erkenntnisse in naher Zukunft nicht in ein Instrument für die städtebauliche Praxis weiterentwickelt werden können. Gründe dafür sind zum Beispiel die geringe Verfügbarkeit von Informationen und die fehlende Belastbarkeit der Daten. Möglich ist jedoch, die wesentlichen Wechselwirkungen im Planungsprozess zu adressieren und für jeden Planungsprozess zu diskutieren. [2]

2.3 Analyse des Stands des Wissens

In den Kapiteln 2.1 und 2.2 werden verschiedene Aspekte des Stands des Wissens durchleuchtet, die als Grundlage dienen, das Ziel dieser Arbeit zu erreichen. Zudem zeigt das vorhandene Wissen Möglichkeiten und Grenzen bestehender Ansätze auf, auf denen im Weiteren aufgebaut werden soll. In Tabelle 1 sind Kriterien dargestellt, die der Zielsetzung dieser Arbeit dienen. Diesen Kriterien werden die in Kapitel 2 beschriebenen wissenschaftlichen Ansätze gegenübergestellt, um den Forschungsbedarf dieser Arbeit aufzuzeigen. Die Reihenfolge der Ansätze der ersten Spalte orientieren sich an ihrer Einführung in Kapitel 2. Drei Einordnungen ermöglichen die Gegenüberstellung der Kriterien und Ansätze. Ein „x“ beschreibt, dass das Kriterium in dem Ansatz bereits Bestandteil ist und mitbeachtet wird. Das „o“ besagt im Gegensatz dazu, dass das Kriterium noch keine Beachtung erfährt. Mit der Bewertung „(x)“ wird verdeutlicht, dass das Kriterium nur teilweise integriert oder indirekt mitbeachtet wird. Die Bewertung erfolgt basierend auf Kapitel 2 durch eine qualitative Einschätzung der Autorin.

Tabelle 1: Beurteilung und Gegenüberstellung bestehender Ansätze anhand abgeleiteter Kriterien

	Lebenszyklusphasen werden berücksichtigt	Anwendbar für adaptive Gebäude	Systemuntersuchung wird mitberücksichtigt	Unterstützung des gesamten Planungsprozesses	Adressierung von Umweltpunkten	Gebäude- und Komponentenebene sind erfasst	Integration in den Planungsprozess
HOAI [68]	o	o	o	x	o	x	x
Honold [74]	x	x	o	x	o	x	x
DIN EN ISO 15978 [26]	x	o	o	o	x	x	o
Generische Ökobilanzdatenbank für das Bauwesen (z.B. ÖKOBAUDAT [12])	x	o	o	o	x	x	o
Zertifizierungssysteme (z.B. DGNB [23])	x	o	o	(x)	x	x	o
EeBGuide [48]	x	o	o	x	x	x	o
Level(s) [34, 33]	x	o	o	x	x	x	(x)
BIM2LCA4IP [36]	x	o	o	x	x	x	x
Battisti, Crepsi, Persiani [4, 20, 21]	x	(x)	o	o	x	o	o
Anders [2]	x	o	x	o	o	o	o
Hafner [57]	x	o	x	o	o	o	o

x = Bestandteil

(x) = Indirekter Bestandteil

o = Nicht Bestandteil

Die HOAI [68] ist der derzeitige Ausgangspunkt für die Planung von konventionellen Gebäuden und Komponenten. Diese dient lediglich als Planungsinstrument für konventionelle Gebäude und lässt dabei keine Betrachtung von adaptiven Gebäuden, Umweltaspekten, Wechselwirkungen sowie dem vollständigen Lebenszyklus zu. Derzeit ist in [74] der Planungsprozess für adaptive Gebäude in Entwicklung. Dieser beinhaltet oder soll zukünftig alle notwendigen Schritte für die Planung adaptiver Gebäude beinhalten. Umweltaspekte sind dort methodisch angedacht, aber noch nicht integriert. Eine ausführliche Systemuntersuchung ist ebenfalls nicht enthalten.

Die DIN EN 15978 [26] beschreibt die Durchführung von Ökobilanzen konventioneller Gebäude. Dies ist mit einigen Anpassungen auch auf adaptive Gebäude anzuwenden. Solche Anpassungen müssen noch erarbeitet und vor allem auf den gesamten Planungsprozess adaptiver Gebäude übertragen und integriert werden. Eine Systemuntersuchung wird nicht berücksichtigt. Ebenso gibt es einige Datenbanken wie die ÖKOBAUDAT [12], die für die Berechnung adaptiver Gebäude angewandt werden können. Für die Abbildung adaptiver Systeme fehlt häufig noch eine spezifische Datengrundlage. Zudem fehlt die Betrachtung des gesamten Systemgefüges und der Planungsmerkmale.

Mit Zertifizierungssystemen wie der DGNB [23] und Arbeiten wie dem EeBGuide [48], Level(s) [33, 34] und dem Projekt BIM2LCA4IP [36] wurden gute Möglichkeiten geschaffen, Umweltaspekte im Planungsprozess konventioneller Gebäude zu thematisieren. Jedoch haben diese keine umfassende Systemuntersuchung hinterlegt und lassen sich zudem nicht ohne methodische Anpassungen auf die Planungsphasen adaptiver Gebäude übertragen. Es fehlt in allen Fällen eine Untersuchung des Systemgefüges. Zwei Schnittstellen wurden mit einem „(x)“ bewertet. Zum einen werden mittels der Zertifizierungssysteme grundlegende Hilfestellungen für Planungsphasen zur Verfügung gestellt. Diese sind jedoch nicht tiefgehend anwendbar und besonders in frühen Planungsphasen nicht anzuwenden. Zum anderen unterstützt Level(s) zwar über alle Planungsphasen hinweg, jedoch ist bislang keine konkrete und detaillierte Integration in einen Planungsprozess vorgenommen worden.

Battisti, Crepsi und Persiani [4, 20, 21] betrachten die frühen Planungsphasen adaptiver Gebäudetechnologien für Fassaden hinsichtlich ihrer Umweltaspekte ohne jedoch einen konkreten Planungsphasenbezug herzustellen. Der Fokus des entwickelten Werkzeugs liegt derzeit allein auf passiv adaptiven Systemen, weshalb das Kriterium der Anwendbarkeit für adaptive Gebäude nur als ein indirekter Bestandteil bewertet wird. Zudem wird kein kompletter Gebäudebezug hergestellt, sondern nur

adaptive Fassaden betrachtet und ferner die definierten Parameter nicht auf ihre Wechselwirkungen untersucht.

Hafner [57] und Anders [2] haben die Systemtheorie auf konventionelle Gebäude und deren Stadtquartiere angewandt und ergründet, welche Erkenntnisse daraus für den Planungsprozess abgeleitet werden können. Darauf kann zwar aufgebaut werden, jedoch fehlt der konkrete Planungsbezug, die erweiterte Perspektive auf Adaptivität, eine Quantifizierung von Umweltaspekten sowie die Erfassung von Gebäude- und Komponentenebene.

Bislang gibt es noch keinen Ansatz, der alle in der Tabelle dargestellten Kriterien beinhaltet. Deshalb besteht Forschungsbedarf, um eine Methodik zu entwickeln, die die Umweltaspekte adaptiver Gebäude ausreichend im Planungsprozess adaptiver Gebäude identifiziert. Für diese Entwicklung der Methodik ist auf die Stärken der vorhandenen Werkzeuge und Ansätze aufzubauen. Es ist eine Kompatibilität zu gewährleisten, die zum einen die Umweltaspekte im Planungsprozess konventioneller Gebäude integrieren, zum anderen muss eine Kompatibilität zum Planungsprozess adaptiver Gebäude gegeben sein. Bisher sind drüber hinaus noch keine Arbeiten bekannt, die die neuen Einflussfaktoren und Wechselwirkungen adaptiver Systeme in Gebäuden im Kontext zu konventionellen Gebäuden wie auch ihrer Umweltaspekte erfassen. Eine Systemuntersuchung wird benötigt, um alle wesentlichen Einflüsse und Wechselwirkungen im neuartigen System der Planung adaptiver Gebäude zu erfassen und für die Abschätzung der Umweltwirkungen zu nutzen. Auf Basis der Systemuntersuchungen sollen zuletzt nicht nur Handlungsempfehlungen für den Planungsprozess adaptiver Gebäude gegeben werden, da diese sonst unter Umständen nicht genügend beachtet werden. Insofern wird eine umfassende Methodik entwickelt, die die Handlungsempfehlungen integriert und darauf aufbauend Umweltwirkungen abschätzt.

3 Methodikentwicklung

Aufbauend auf dem Stand des Wissens und dessen Analyse folgen nun die Rahmenbedingungen die bei der Entwicklung der Methodik zur Abschätzung von lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen im Planungsprozess adaptiver Gebäude (ActUate) zu beachten sind. Dafür werden in Kapitel 3.1 zuerst die Anforderungen an die Methodik formuliert, um ihre Funktionsfähigkeit zu gewährleisten. Im Anschluss wird das weitere Vorgehen für die Entwicklung der Methodik beschrieben.

3.1 Anforderungen an die Methodik

Die Anforderungen werden aus dem Stand des Wissens und dessen Analyse in Kapitel 2.3 abgeleitet. Diese teilen sich in die methodischen und praktischen Anforderungen auf, die in Kapitel 7.1 erneut für die Bewertung der Methodik herangezogen werden. Zum Teil wurden Anforderungen bereits in [111] formuliert, die nachfolgend zitiert werden.

3.1.1 Methodische Anforderungen

Die methodischen Anforderungen beziehen sich auf die allgemeine Gültigkeit sowie die Übertragbarkeit der Methodik.

Anknüpfung an die Methode der Ökobilanz: Für die Abschätzung der Umweltwirkungen wird die standardisierte Methode der Ökobilanz genutzt. Deren Vorgehen ist in der DIN EN ISO 14040 [29] und DIN EN ISO 14044 [30] beschrieben. Darüber hinaus sind in der DIN EN 15978 [26] ergänzende Informationen für Ökobilanzen von Gebäuden dargestellt. ActUate soll die Anknüpfung an bestehende Normen für Ökobilanzen von Gebäuden ermöglichen, um eine kompatible Ergänzung sicherzustellen.

Fallspezifische Anwendung: Die Methodik muss für jede Art adaptiver Gebäude und Komponenten fallspezifisch anwendbar sein. Dazu zählt unter anderem die individuelle Beachtung der verschiedenen Rahmenbedingungen wie zum Beispiel des Standorts mit seinen klimatischen Bedingungen und den jeweiligen Energieverbräuchen [111].

Transparenz und Reproduzierbarkeit der Teil- und Endergebnisse: Für wirkungsvolle Erkenntnisse ist zu gewährleisten, dass die Methodik transparente und

reproduzierbare Ergebnisse ermittelt. Das heißt, dass bei der Anwendung von ActUate sicherzustellen ist, dass eine vollständige Beschreibung der Datengrundlage und deren Rechenwege sowie die Formulierung der getroffenen Annahmen erfolgt.

Methodische Integration in den Planungsprozess adaptiver Gebäude: Die Anwendung von ActUate muss methodisch in den Planungsprozess adaptiver Gebäude integriert werden, was bedeutet, dass geeignete zeitliche Phasen im Planungsprozess adaptiver Gebäude für die Anwendung von ActUate definiert werden müssen. In den Phasen müssen geeignete Daten für eine Abschätzung vorhanden sein, ferner sind die Ergebnisse aus ActUate sinnvoll zu übergeben, damit diese im Planungsprozess angewandt werden können. Dafür sind zudem die Anforderungen des allgemeinen Planungsprozesses adaptiver Gebäude [73] zu beachten.

Der Planungsprozess adaptiver Gebäude ist derzeit noch in der Entwicklung. Die Methodik muss daher auf den aktuellen Erkenntnissen des Planungsprozesses adaptiver Gebäude aufbauen, wie auch zukünftige Erkenntnisse integrieren können.

Modularer Aufbau und Fortschreibbarkeit: Adaptive Gebäude befinden sich derzeit in der Grundlagenforschung. Damit die Methodik auch nach Abschluss der (Grundlagen-) Forschungen langfristig genutzt werden kann, muss diese anpassbar sein und verfeinert werden können. Dafür ist ein modularer Aufbau sinnvoll.

Anwendbarkeit bei konventionellen Gebäuden: Besonders in frühen Planungsphasen adaptiver Gebäude werden diese hinsichtlich ihres Adaptionlevels ausgelegt und optimiert. Hierbei können auch Varianten ohne Adaptionlevel, also mit konventioneller Bauweise, entworfen werden. Die Methodik muss insoweit für konventionelle Gebäude und Komponenten anwendbar sein, um einen belastbaren Variantenvergleich durchführen zu können.

Individueller Softwareeinsatz: Für die ökologische Bilanzierung adaptiver Gebäude sind sowohl Maschinenbauelemente wie auch Bauwesenelemente zu modellieren. Je nach Fallbeispiel können sich dafür unterschiedliche Softwaresysteme oder auch unterschiedliche Datensätze eignen. Die Wirkungsabschätzung sollte sich mit verschiedenen und vergleichbaren Softwaresystemen umsetzen lassen.

3.1.2 Praktische Anforderungen

Die praktischen Anforderungen sollen die An- und Verwendbarkeit der Methodik sowie ihrer Ergebnisse sicherstellen.

Vertretbarer Zeitaufwand: Der allgemeine Planungsprozess adaptiver Gebäude ist sehr komplex und zeitaufwändig. Die Methodik muss daher so aufgebaut sein, dass sie in einem vertretbaren Zeitaufwand durchgeführt werden kann. Die Ergebnisqualität soll dabei im Verhältnis zum angemessenen Arbeitsaufwand stehen.

Konsistenz und Kompatibilität der Datengrundlage: Für die praktische Anwendung der Methodik ist eine konsistente und kompatible Datengrundlage notwendig. Bei der Datengrundlage ist eine ausreichende Qualität sicherzustellen, um verlässliche Aussagen für den Planungsprozess zu generieren.

Datenverfügbarkeit: Für die Abschätzung der Umweltwirkungen muss die Datenverfügbarkeit garantiert sein und im Laufe der Planung detaillierter werden [111].

Iterative und flexible Anwendung: Die Planungsphasen von adaptiven Gebäuden besitzen keinen stringenten Ablauf. Die Methodik ist daher iterativ und flexibel auszubauen und sie muss dem Vorgehen in der Architektur adäquat anpassbar sein.

Möglichkeit eines Variantenvergleichs: Im Planungsprozess adaptiver Gebäude ist nicht immer klar, wie Entwürfe und Konzepte am umweltfreundlichsten zu gestalten sind. Werden verschiedene Entwürfe und Konzepte gegenübergestellt, kann eine Einschätzung gelingen. Dafür muss ActUate Variantenvergleiche von Entwürfen und Konzepten ermöglichen. [111]

Entscheidungsunterstützung im Planungsprozess adaptiver Gebäude: Die Ergebnisse der Methodik sollen die Entscheidungsgrundlage im Planungsprozess adaptiver Gebäude erweitern und die Planerinnen befähigen, auf Basis spezifisch ermittelter Umweltwirkungen Entscheidungen zu treffen [111].

3.2 Vorgehensweise der Methodikentwicklung

In Abbildung 16 ist die Vorgehensweise für die Entwicklung der Methodik ActUate dargestellt.

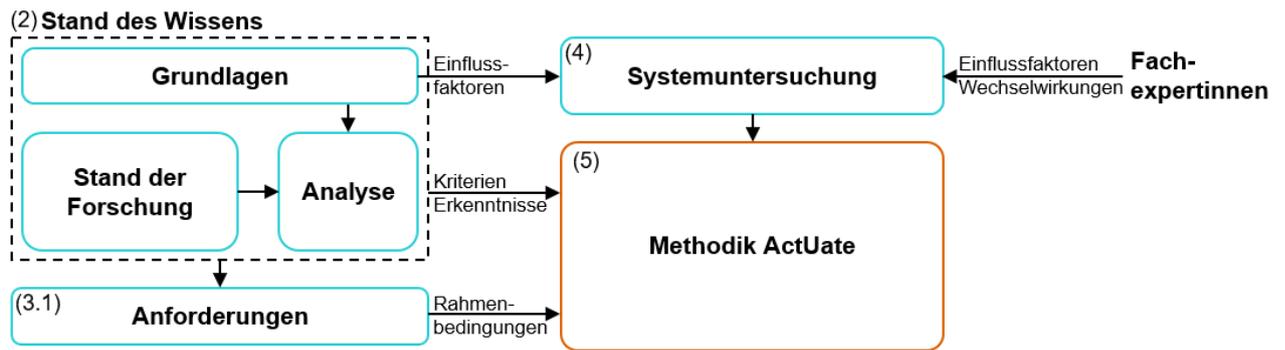


Abbildung 16: Vorgehensweise zur Methodikentwicklung

Der Stand des Wissens dient als generelle Grundlage für die Methodikentwicklung. Hieraus lassen sich unter anderem notwendige Kriterien für ActUate (Kapitel 2.3) sowie Erkenntnisse hinsichtlich Stärken, Schwächen und Forschungslücken des Stands der Forschung ableiten. Darüber hinaus sind aus dem Stand des Wissens bereits in Kapitel 3.1 Anforderungen für ActUate abgeleitet worden. Diese bilden die Rahmenbedingungen der Methodikentwicklung, um eine spätere Anwendbarkeit sicherzustellen. Die Aufarbeitung der Grundlagen und das Wissen von Fachexpertinnen ermöglichen in Kapitel 4 eine umfassende Systemuntersuchung. Diese hat das Ziel, ein Verständnis über die komplexen Zusammenhänge zu erlangen, um die wesentlichen Wechselwirkungen zu identifizieren. Auf Basis der Grundlagen wird dafür eine Literaturrecherche vorgenommen, um die Einflussfaktoren zu ermitteln. Fachexpertinnen ergänzen in Workshops den Einflussfaktorenkatalog und untersuchen zudem Wechselwirkungen. Die Systemuntersuchung ermöglicht, effektive Maßnahmen zu formulieren, die die Beachtung der komplexen Systemzusammenhänge bei der Entwicklung der Methodik ActUate sicherstellen.

4 Systemuntersuchung

In dieser Untersuchung wird eine umfassende Betrachtung des neuartigen Systems der adaptiven Gebäude und ihrer Umweltaspekte im Kontext des Planungsprozesses vorgenommen. Diese dient als Teil der Entwicklung von ActUate, mit dem Ziel alle wesentlichen Einflüsse des Systems zu berücksichtigen. Begonnen wird in Kapitel 4.1, die Vorgehensweise der Systemuntersuchung darzulegen. In Kapitel 4.2 wird der Untersuchungsrahmen der Methodik definiert, also beschrieben, welche Systemgrenzen die Methodik umfasst und ausgehend davon die Einflussfaktoren des Systems erfasst. Auf Basis der Einflussfaktoren folgt eine umfangreiche Wechselwirkungsanalyse des Systems, die in Kapitel 4.5 weitreichende Einflüsse identifizieren lassen. Abschließend folgt ein Zwischenfazit sowie die Formulierung von Handlungsempfehlungen für die Methodik ActUate.

4.1 Vorgehensweise der Systemuntersuchung

Bei der Systemuntersuchung wird auf die in Kapitel 2.1.4 vorgestellte Systemtheorie zurückgegriffen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass keine sektorale Betrachtungsweise entsteht, sondern das System auf der Makroperspektive umfassend untersucht wird. In Abbildung 17 ist die Vorgehensweise zu sehen und welches Ziel pro Schritt verfolgt wird.

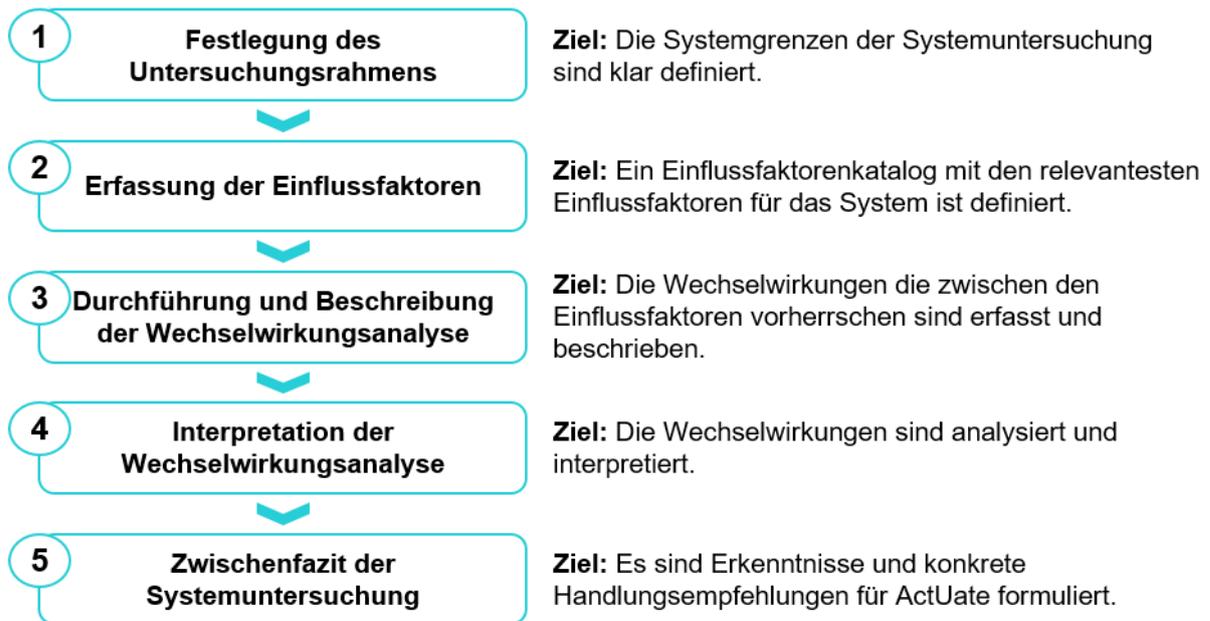


Abbildung 17: Vorgehensweise bei der Systemuntersuchung

4.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

Der Untersuchungsrahmen der Methodik umfasst adaptive Gebäude und ihre Umweltaspekte. In ihm wird das gesamte adaptive Gebäude mit seinen zu erfüllenden Funktionen betrachtet. Dazu zählen auch die einzelnen Komponenten, aus denen das adaptive Gebäude besteht. Besonderes Hauptaugenmerk liegt dabei auf den neuartigen adaptiven Systemen. Im Fokus der Betrachtung liegt das Ziel, Ressourcen und schädliche Umweltwirkungen einzusparen. Nachfolgend gelten in dieser Arbeit als Umweltwirkungen solche, die zur Erhaltung des Ökosystems reduziert werden sollten. Um die Umweltaspekte zu quantifizieren, wird die Methode der Ökobilanz verwendet.

Abbildung 18 stellt den beschriebenen Untersuchungsrahmen noch einmal grafisch dar.

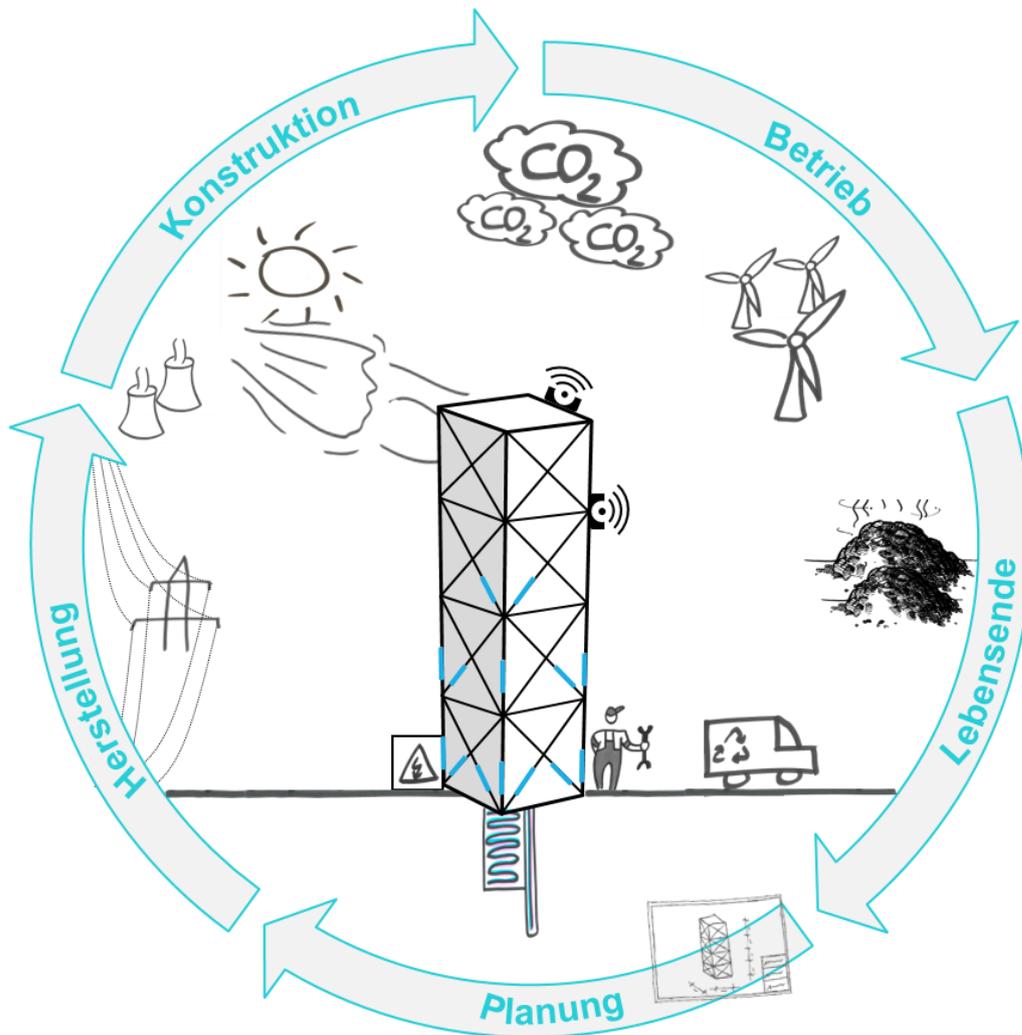


Abbildung 18: Untersuchungsrahmen für die Integration der Umweltaspekte in den Planungsprozess adaptiver Gebäude

Um Ressourcen und Umweltwirkungen einzusparen, sollen die Umweltaspekte schon in den Planungsphasen adaptiver Gebäude identifiziert werden. In den Untersuchungsrahmen fällt daher auch der gesamte Planungsprozess adaptiver Gebäude, der allerdings derzeit erst für die adaptiven Tragwerke vollständig durchdacht ist. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, soll angenommen werden, dass der Planungsprozess adaptiver Gebäude simultan abläuft.

Die Anwenderin der Methodik ist eine Ökobilanzexpertin im Rahmen des Planungsprozesses adaptiver Gebäude. In Anlehnung an den Bauteam Ansatz [3] wird für ActUate angenommen, dass der kommunikative Austausch und die Datenübermittlung zwischen der Ökobilanzexpertin und der hauptverantwortlichen Planerin liegt. Die Planerin steht in dieser Arbeit stellvertretend für die Person, die Abschätzungen

zu Umweltwirkungen benötigt und mit der die Ökobilanzexpertin die Ziele, Datengrundlage, Vorgehensweise und Ergebnisse von ActUate bespricht. Dabei wird angenommen, dass sich die Planerin mit den einzelnen Fachdisziplinen des Planungsprozesses kontinuierlich austauscht, die die Datengrundlage für die Abschätzung der Umweltwirkungen liefern.

Aktuell richtet sich bei Ökobilanzen von Gebäuden der Fokus auf die Auswertung des Treibhauspotentials [18, 58, 97], da diese unter anderem einen entscheidenden Anteil an den weltweiten Treibhausgasemissionen und damit an dem anthropogenen Klimawandel aufweisen. Diese Arbeit konzentriert sich daher bei den Auswertungen von Umweltwirkungen auf das Treibhauspotential. Dies bedeutet jedoch nicht, dass andere Wirkungsgrößen, wie die Eutrophierung, nicht auch eine wesentliche Bedeutung im Umweltschutz haben und grundsätzlich mitberücksichtigt werden sollten.

4.3 Erfassung der Einflussfaktoren

Die Einflussfaktoren werden, wie in Abbildung 19 dargestellt, in vier Schritten erfasst. Der Begriff Einflussfaktoren wird in den Abbildungen dieses Teilkapitels mit der Abkürzung EF dargestellt.

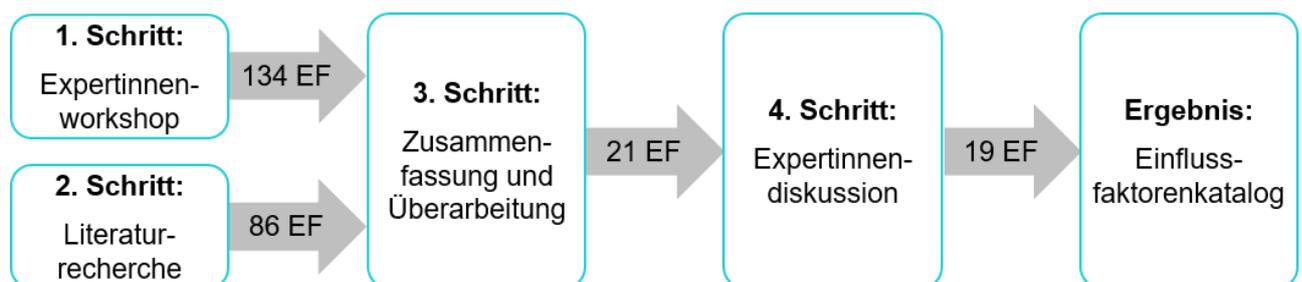


Abbildung 19: Schritte der Erfassung der Einflussfaktoren (EF)

Den ersten Schritt bildete ein dreistündiger Expertinnenworkshop. Darin vertreten waren neun Expertinnen, die stellvertretend für die verschiedenen Stakeholderinnen aus dem Planungsprozess adaptiver Gebäude stehen. Mit diesen neun Stakeholderinnen gelingt es, alle relevanten Perspektiven auf adaptive Gebäude abzudecken. Genauer waren sieben Expertinnen aus dem Projektteam des SFB 1244 vertreten, die die Bereiche der Architektur, Bauingenieurwesen, Bauphysik, Maschinenbau

(Aktorik und Fassadenelemente), Systemdynamik sowie Sicherheitstechnik repräsentieren. Ferner nahmen zwei Expertinnen der Abteilung GaBi des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP aus dem Bereich der Ökobilanzierung teil, wodurch ein umfassender Blick auf Umweltaspekte im Allgemeinen, wie auch das nachhaltige Bauen im Speziellen gelang. Der Workshop startete mit einer Einführung ins Thema und einer Zieldefinition. Dazu sammelte jede Expertin zunächst für sich in einem Brainwriting Einflussfaktoren, die dann nacheinander vorgestellt wurden und als Nächstes weiter ergänzt werden konnten. Nach dem Workshop digitalisierte die Autorin alle genannten Einflussfaktoren, sortierte sie und fasste identische Einflussfaktoren zusammen. Das Ergebnis des Expertinnenworkshops sind 134 verschiedene Einflussfaktoren, die in Anhang A.1 dargestellt sind.

Im zweiten Schritt fand eine umfangreiche Literaturrecherche statt. Die Literaturrecherche baut nicht auf den Ergebnissen des Workshops auf, sondern ist davon unabhängiger Bestandteil einer Bachelorarbeit [125]. Die unabhängige Erarbeitung der Einflussfaktoren ermöglicht, doppelte Nennungen von Einflussfaktoren im Vergleich zu dem Expertinnenworkshop zu identifizieren und eine nicht beeinflusste und damit umfassende Perspektive auf das System sicherzustellen. Das Ergebnis der Literaturrecherche sind insgesamt 86 verschiedene Einflussfaktoren, die sich ebenfalls in Anhang A.1 befinden.

In Kapitel 2.1.4 wird beschrieben, dass ein Einflussfaktorenkatalog je nach System zwischen 20 und 40 Einflussfaktoren beinhalten sollte. Wenn ein System mit mehr als 40 Einflussfaktoren dargestellt wird, steigt die Komplexität der Wechselwirkungen überproportional und es ist nicht möglich eine übersichtliche und aussagekräftige Analyse durchzuführen. Im dritten Schritt wurde daher aus den 134 Einflussfaktoren (Expertinnenworkshop) und den 86 Einflussfaktoren (Literaturrecherche) ein Einflussfaktorenkatalog erarbeitet. Dazu wurden ähnliche sowie doppelt genannte Einflussfaktoren zusammengefasst, wie zum Beispiel die Zusammenführung von Stahl, Beton und Materialien zum Einflussfaktor Materialart. 68 Einflussfaktoren wurden aussortiert, die außerhalb des Untersuchungsrahmens liegen, wie zum Beispiel finanzielle Kosten oder das Stadtbild. Das Ergebnis ist ein Katalog von 21 Einflussfaktoren. Die ausführliche Aussortierung und Zusammenfassung des Einflussfaktorenkatalogs sind in Anhang A.1 dargestellt.

Im vierten Arbeitsschritt wurden die 21 Einflussfaktoren in einer erneuten Expertinendiskussion mit vier Expertinnen aus dem Bereich der Ökobilanzierung der Abteilung GaBi, inklusive der Autorin, erörtert. Des Weiteren clusterten die Expertinnen

die 21 Einflussfaktoren in fünf thematische Bereiche (Ressourcen, Skalierungsfaktoren, externe Faktoren, Effekte auf die Umwelt, Gebäudefunktionsanforderungen). Im Anschluss an die Expertinnendiskussion wurden noch zwei Einflussfaktoren aus der Betrachtung ausgeschlossen. Dies war der Einflussfaktor Funktionen, da dieser für eine Systemuntersuchung als übergeordneter und abstrakter Einflussfaktor zu sehen ist. Zum anderen wurden die zwei Einflussfaktoren Stockwerke und Grundfläche zu einem Einflussfaktor (Ausprägung der Kubatur) zusammengefasst. Im Anschluss an die Expertinnendiskussion wurden die 19 geclusterten Einflussfaktoren in ihrer Definition und Bezeichnung präzisiert und verfeinert.

Das Ergebnis ist ein Einflussfaktorenkatalog von 19 geclusterten Einflussfaktoren, die in Abbildung 20 dargestellt sind. Zudem befinden sich in Anhang A.2 die Definitionen der verschiedenen Einflussfaktoren. Diese sind nicht Bestandteil des Glossars.

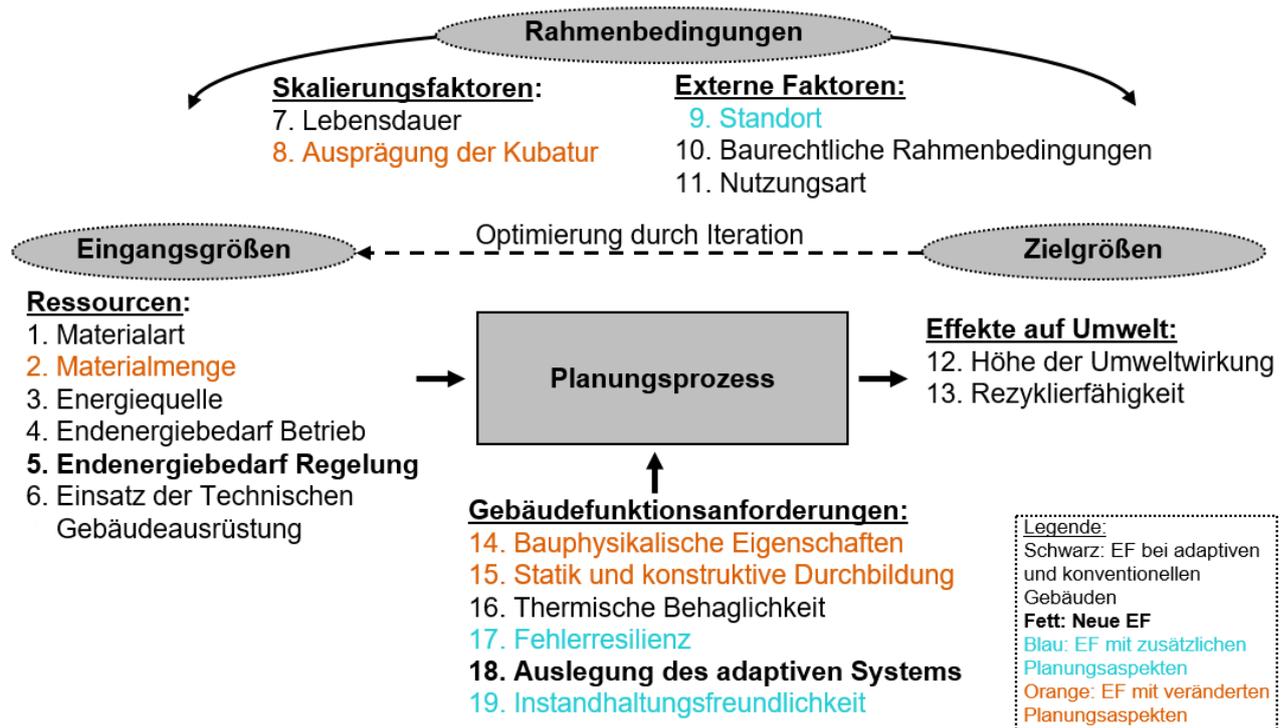


Abbildung 20: Visualisierung des geclusterten Einflussfaktorenkatalogs

Die Einflussfaktoren des Ressourcenclusters gehen als Eingangsgröße in den Planungsprozess adaptiver Gebäude ein. Das Cluster der Effekte auf die Umwelt stellt in dieser Systemuntersuchung die zu optimierenden Zielgrößen des Planungsprozesses dar. Die Eingangsgroßen und Zielgrößen stehen dabei in einer optimierenden

den Iterationsschleife. Die Skalierungsfaktoren und externen Faktoren sind als Rahmenbedingungen des Planungsprozesses zu sehen. Aus der Literaturrecherche und den Expertinnendiskussionen hat sich ergeben, dass die 19 Einflussfaktoren drei verschiedene Ausprägungen besitzen, die in der Legende der Abbildung dargestellt sind und die nachfolgend beschrieben werden.

Einflussfaktoren mit fatter Schrift sind, im Vergleich zu konventionellen Gebäuden, neu hinzugekommen. Dabei handelt es sich um den Endenergiebedarf zur Regelung und die Auslegung des adaptiven Systems.

In blauer Schrift sind die Einflussfaktoren dargestellt, welche in Bezug auf adaptive Systeme zusätzliche Planungsaspekte mit sich bringen. Das ist zum Beispiel der Einflussfaktor Standort, aus welchem sich die klimatischen Bedingungen ergeben. Diese sind bei konventionellen Gebäuden eine Rahmenbedingung, nach denen ein Gebäude zum Beispiel hinsichtlich der bauphysikalischen Eigenschaften ausgelegt werden muss. Für adaptive Gebäude stellen die klimatischen Bedingungen potentielle tägliche Einwirkungen dar, welche somit in der Planung einen anderen Stellenwert bekommen. Ein anderes Beispiel ist die Instandhaltung adaptiver Gebäude, da adaptive Systeme einen sehr viel größeren Instandhaltungsbedarf haben.

Zuletzt sind in orange die Einflussfaktoren mit veränderten Planungsaspekten markiert. Zum Beispiel soll die Materialmenge bei adaptiven Gebäuden möglichst gering gehalten werden, was bei konventionellen Gebäuden nicht immer der Fall ist.

4.4 Durchführung und Beschreibung der Wechselwirkungsanalyse

Die ermittelten 19 Einflussfaktoren werden durch eine Einflussmatrix, wie in Kapitel 2.1.4. beschrieben, auf ihre Wechselwirkungen im Planungsprozess adaptiver Gebäude untersucht. Dafür werden die 19 Einflussfaktoren in eine Einflussmatrix überführt. Für die Bewertung der einzelnen Wechselwirkungen gelten nachfolgende Grundfragen und Antwortmöglichkeiten mit Bewertungsskala nach Vester [129]:

Wird Einflussfaktor A verändert, wie stark verändert sich dann – ganz gleich in welche Richtung – durch direkte Einwirkung von A der Einflussfaktor B?

- 0:** Keine Beziehung (gar keine, sehr schwache Einwirkung)
- 1:** Schwache Beziehung (schwache Einwirkung)

- 2: Proportionale Beziehung (bei einer Veränderung von B entsteht eine gleich starke Veränderung von A)
- 3: Starke, überproportionale Beziehung (bei einer geringen Veränderung von B entsteht eine starke Veränderung von A)

Für die Erarbeitung einer finalen Einflussmatrix wurden 15 Einflussmatrizen von 26 Expertinnen, teilweise in Teamarbeit, bewertet. Die Expertinnen setzten sich aus den Fachdisziplinen der Ökobilanz (18 Personen), Statik (2 Personen), Bauphysik (1 Person), Behaglichkeit (1 Person), Systemdynamik (2 Personen) und Expertinnen aus dem Bereich der Planungsphasen adaptiver Gebäude (2 Personen) zusammen. Die Fachdisziplinen der Statik, Bauphysik, Behaglichkeit, Systemdynamik und Expertinnen aus dem Bereich der Planungsphasen adaptiver Gebäude stammen es dem Projektteam des SFB1244 und haben die Wechselwirkungen ihrer persönlichen Expertise untersucht. Zum Beispiel ermittelte die Bauphysikerin die Wechselwirkungen der Bauphysik. Wenn für die Untersuchung mehr als eine Expertin pro Bereich beteiligt war, wurde die Einflussmatrix in Teamarbeit von zwei Personen erarbeitet. Die Expertinnen der Fachdisziplin der Ökobilanz stammen aus der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik. Hierbei haben zwei Expertinnen (inklusive der Autorin), welche eine umfassende Kenntnis im Systemrahmen der adaptiven Gebäude und deren Umweltaspekte besitzen, alle Wechselwirkungen der Einflussmatrix bewertet. Die restlichen 16 Expertinnen der Ökobilanz haben je zu zweit einzelne Wechselwirkungen bewertet, die im Gesamten mindestens einmal alle Wechselwirkungen abdecken. Für die finale Einflussmatrix wurde für jede Wechselwirkung ein Durchschnittswert aus den verschiedenen Bewertungen gebildet und, wenn nötig, auf- oder abgerundet. Die Erarbeitung der finalen Einflussmatrix mit allen wichtigen Stakeholderinnen des Untersuchungsrahmens ermöglicht sowohl die technische und fachliche Perspektive adaptiver Gebäude als auch die Perspektive der Ökobilanz ausführlich zu untersuchen und integrieren. Die genaue Aufteilung der Fachdisziplinen und alle 15 ausgefüllten Einflussmatrizen sind in Anhang B.1 aufgeführt.

In Tabelle 2 ist die finale Einflussmatrix, inklusive der Integration der Aktiv- und Passivsumme, dargestellt. Zur besseren Übersicht werden die Präpositionen und Artikel der Einflussfaktoren in den nachfolgenden Tabellen und Abbildungen vernachlässigt. Eine zusätzliche Visualisierung der Tabelle 2 ist zudem in Anhang B.2 und B.3 dargestellt.

Tabelle 2: Einflussmatrix adaptiver Gebäude und ihrer Umweltaspekte

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme
Materialart	-	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	2	3	2	2	0	2	2	1	18
Materialmenge	0	-	0	0	1	1	0	0	0	0	0	3	0	2	2	0	2	2	0	13
Energiequellen	0	0	-	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	4	
Endenergiebedarf Betrieb	0	0	0	-	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	6	
Endenergiebedarf Regelung	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	1	5	
Einsatz TGA	1	0	2	2	0	-	0	1	0	0	0	2	1	0	1	2	2	0	16	
Lebensdauer	1	0	0	0	0	1	-	0	1	0	0	2	0	0	2	0	1	1	9	
Ausprägung Kubatur	0	1	0	1	1	2	0	-	0	0	0	0	0	2	3	0	1	2	13	
Standort	2	1	2	2	1	2	2	1	-	2	2	0	0	0	3	0	0	2	23	
Baurechtliche Rahmenbedingungen	2	0	2	2	0	2	0	1	1	-	2	0	2	2	2	0	1	0	20	
Nutzungsart	1	1	0	2	1	2	2	3	2	2	-	0	0	2	2	1	0	1	23	
Höhe Umweltwirkungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	
Rezyklierfähigkeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	-	0	0	0	0	0	4	
Bauphysikalische Eigenschaften	0	0	0	2	1	0	3	0	0	0	0	0	0	-	0	3	0	0	8	
Statik, konstruktive Durchbildung	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	1	-	0	2	2	14	
Thermische Behaglichkeit	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	2	
Fehlerresilienz	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-	0	5	
Auslegung adaptives System	0	1	0	0	3	0	2	1	0	0	0	1	1	1	0	2	2	-	14	
Instandhaltungsfreundlichkeit	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	7	
Passivsumme	8	5	6	11	9	14	18	7	4	4	4	20	12	12	17	13	15	13	14	-

Auf Basis der Einflussmatrix und der jeweiligen Aktiv- und Passivsummen ist in Abbildung 21 das Systemgrid dargestellt. Auf der Ordinate ist die Aktivsumme zu sehen, die zeigt, wie stark ein Einflussfaktor auf andere Einflussfaktoren wirkt. Auf der Abszisse ist die Passivsumme pro Einflussfaktor abgebildet. Diese zeigt, wie stark der Einflussfaktor von anderen Einflussfaktoren beeinflusst wird. Darüber hinaus sind die lenkbaren Einflussfaktoren (schwarz), der nicht lenkbare Einflussfaktor (orange) und die Indikatoren (blau) markiert.

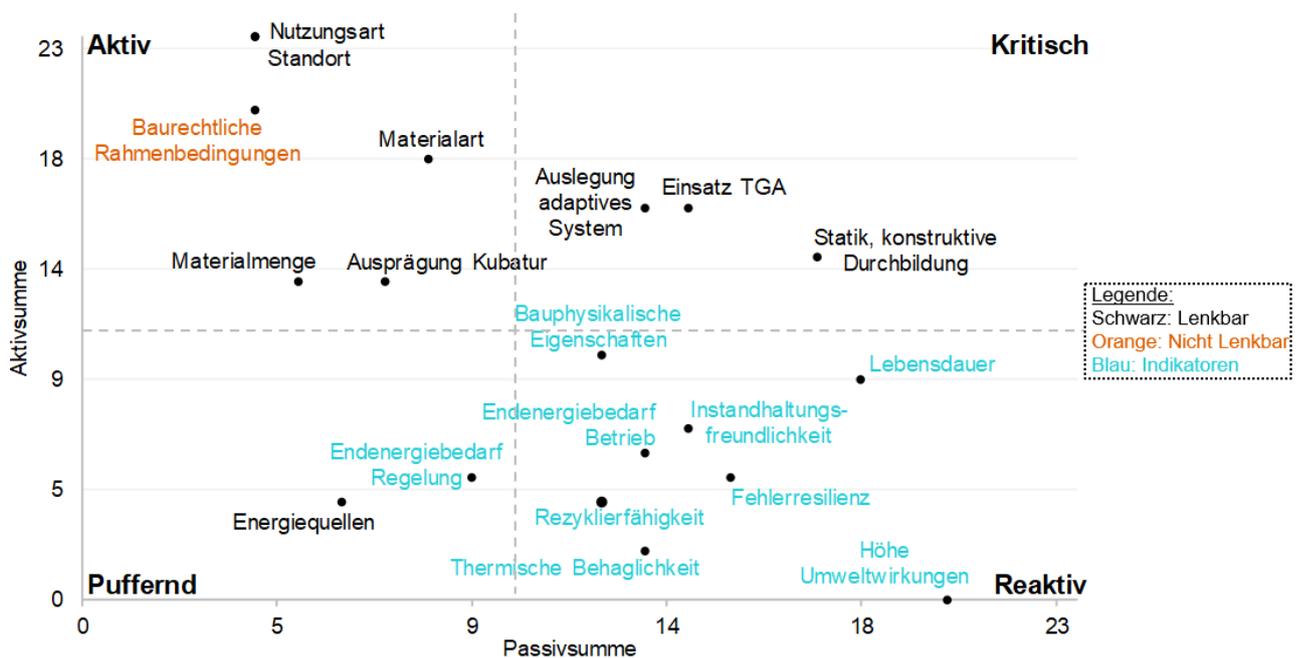


Abbildung 21: Systemgrid adaptiver Gebäude und ihrer Umweltaspekte

Zu sehen ist, dass aktive Einflussfaktoren, wie die Nutzungsart oder der Standort, das System stark beeinflussen und damit eine große Wirkung auf das System und den späteren Planungsprozess ausüben. Werden die aktiven Einflussfaktoren geändert, ergibt sich eine dynamische Anpassung des Systems. Die reaktiven und puffernden Einflussfaktoren, wie die thermische Behaglichkeit oder die Energiequellen, sind als träge und einstellende Einflussfaktoren zu sehen. Die reaktiven Einflussfaktoren werden besonders stark von den anderen Einflussfaktoren bestimmt. Vor allem die Höhe der Umweltwirkungen kann durch ihre Rolle als Messfühler der Planungsmethode gesehen werden. Das heißt, dass sich durch das Ergebnis der Zielgröße Höhe der Umweltwirkung, das Ergebnis des Systems ablesen und bewertet lässt. Die puffernden Einflussfaktoren sind ohne große Wirkung auf das System zu verändern und anzupassen. Die kritischen Einflussfaktoren stehen in starken Wechselwir-

kungen mit verschiedenen Einflussfaktoren. Ihre Veränderung erzeugt komplexe Dynamiken im Planungsprozess. Zu beachten ist, dass die Rolle im Systemgrid nicht die Bedeutung der Einflussfaktoren darstellt. Zum Beispiel wirkt die Energiequelle sehr puffernd und kann daher ohne große Einwirkung auf andere Einflussfaktoren festgelegt und verändert werden. Jedoch hat diese einen großen Einfluss auf die Höhe der Umweltwirkungen, die als Zielwert im späteren Planungsprozess bedeutend ist.

Die Planerin kann die direkt lenkbaren Einflussfaktoren im Planungsprozess aktiv verändern. Die baurechtlichen Rahmenbedingungen als nicht lenkbarer Einflussfaktor, sind jedoch nicht direkt zu verändern und werden daher vorausgesetzt. Indikatoren werden von anderen Einflussfaktoren bestimmt. Zum Beispiel wird der Indikator Fehlerresilienz unter anderem durch die Materialart oder Materialmenge beeinflusst. In Abbildung 21 ist unter anderem dargestellt, dass die meisten aktiven und kritischen Einflussfaktoren direkt lenkbar und damit aktiv beeinflussbar sind.

4.5 Interpretation der Wechselwirkungsanalyse

Durch die Analyse der Wechselwirkungen haben sich für die Integration der Umweltaspekte in den Planungsprozess adaptiver Gebäude einige Erkenntnisse ergeben, welche in Abbildung 22 schematisch dargestellt sind. Entsprechend zu Abbildung 21 sind auch hier die lenkbaren Einflussfaktoren (schwarz), der nicht lenkbare Einflussfaktor (orange) und die Indikatoren (blau) markiert. Von oben nach unten sind zuerst die eher aktiven und lenkbaren Einflussfaktoren erkennbar. Im unteren Bereich der Abbildung sind außerdem die sich einstellenden Indikatoren und eher puffernden und reaktiven Einflussfaktoren abgebildet, die sich aus den oberen Einflussfaktoren ergeben. Die Höhe der Umweltwirkungen ist als Zielgröße des Systems und auch aufgrund der reaktiven Rolle ganz unten zu sehen.

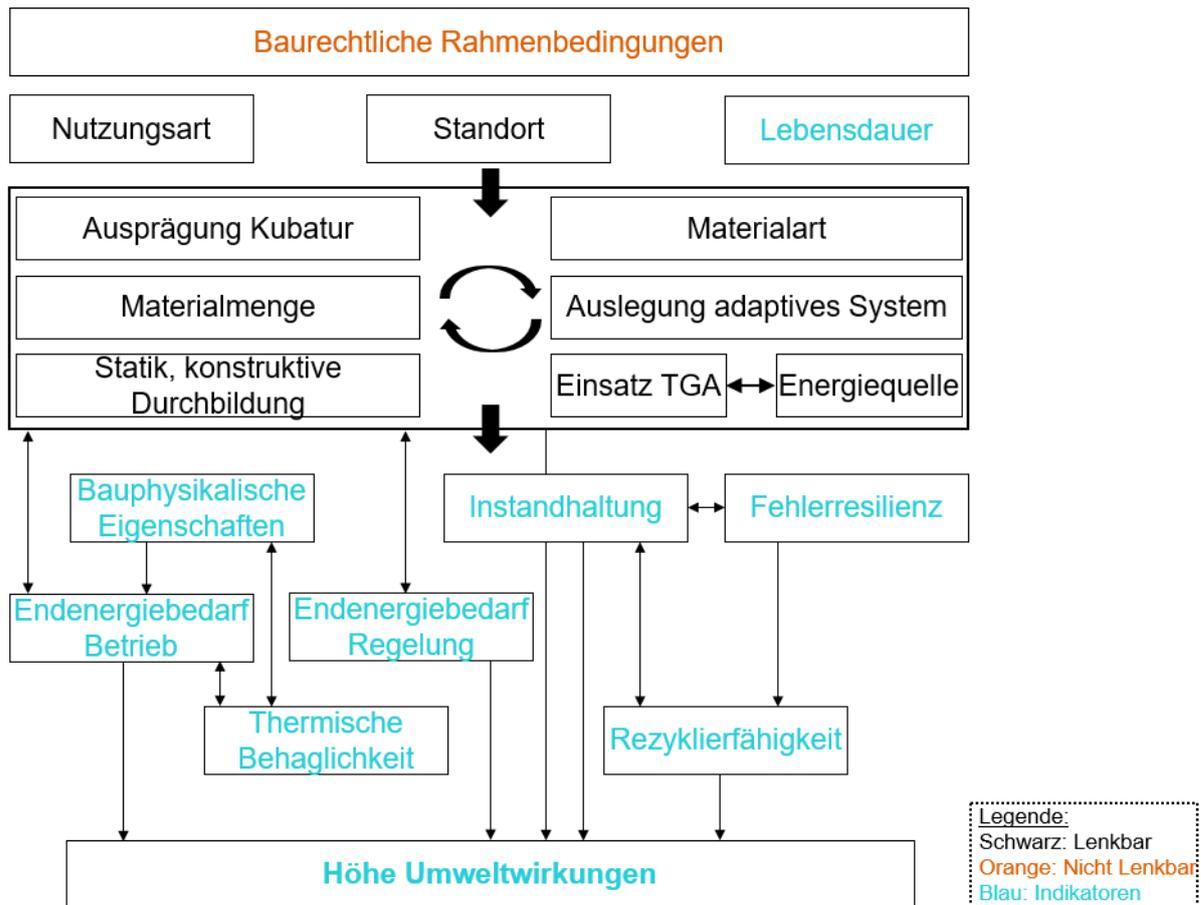


Abbildung 22: Systemdarstellung adaptiver Gebäude und ihrer Umweltaspekte im Planungsprozess

In einem Planungsprozess sollten die ersten vier dargestellten Einflussfaktoren als erstes betrachtet und festgelegt werden. Die baurechtlichen Rahmenbedingungen sind der einzige nicht lenkbare Einflussfaktor, der von außen vorgegeben wird. Dieser steht daher über der ganzen Planung und muss von Beginn an mit beachtet werden. Die aktiven Einflussfaktoren Nutzungsart und Standort haben insgesamt eine große und direkte Wirkung auf die anderen Einflussfaktoren und sollten daher direkt zu Beginn des Planungsprozesses festgelegt werden. Die Lebensdauer ist ein Indikator, die auf viele andere Einflussfaktoren wirkt und gleichermaßen auch von einigen Einflussfaktoren beeinflusst wird. Um undurchsichtige, komplexe Wechselwirkungen zu vermeiden, sollte von vornherein die anzustrebende Lebensdauer einzelner Komponenten, wie auch des gesamten Gebäudes, festgelegt werden. Durch diese Angabe können die restlichen Einflussfaktoren danach ausgerichtet werden und die Höhe der Umweltwirkungen reduziert werden.

Die nachfolgenden, schwarz umrandeten, sieben Einflussfaktoren sind direkt lenkbar. Diese haben durch ihre Rolle große Ein- und Auswirkungen im Planungsprozess. Dies spiegelt sich durch die größtenteils einseitige Wirkung auf die Indikatoren wider. Ferner beeinflussen bis auf die Statik und konstruktive Durchbildung sowie die Ausprägung der Kubatur alle direkt die Höhe der Umweltwirkungen. Diese sieben Einflussfaktoren bieten damit großes Potential für Veränderungen im Planungsprozess. Die Energiequelle ist lenkbar und steht nur wenig in Wechselwirkung mit anderen Einflussfaktoren. Ihr direkter und großer Einfluss auf die Höhe der Umweltwirkungen bietet einen großen Hebel zu deren Reduktion, ohne komplexe Wechselwirkungen im System zu erzeugen.

Die nachfolgend blau gekennzeichneten Einflussfaktoren bilden Indikatoren ab und sind abhängig von Entscheidungen der zuvor beschriebenen Einflussfaktoren. Sie können auch als Zwischenergebnisse bezeichnet werden, da sie unter anderem für die Funktionalität eines Gebäudes wichtig sind. Durch die große Wirkung auf die Höhe der Umweltwirkung spielt die Rezyklierfähigkeit eine wichtige Rolle.

Ganz unten in der Abbildung ist die Höhe der Umweltwirkungen abgebildet. Von den zuvor beschriebenen Einflussfaktoren wirken alle mindestens auf indirektem Wege auf die Höhe der Umweltwirkungen. Direkten Einfluss haben fünf lenkbare Einflussfaktoren (Materialart, Materialmenge, Energiequelle, Einsatz der TGA, Auslegung der Aktorik und Sensorik) und fünf Indikatoren (Lebensdauer, Endenergiebedarf Betrieb und Regelung, Rezyklierfähigkeit, Instandhaltungsfreundlichkeit). Die Höhe der Umweltwirkungen beeinflusst keinen Einflussfaktor.

In Kapitel 1 und 2 wird beschrieben, dass der Endenergiebedarf in B6 durch die Integration adaptiver Systeme fallspezifisch stark zunehmen wird. Zudem zeigt die Untersuchung der Wechselwirkungen einen starken Einfluss des Endenergiebedarfs auf die Höhe der Umweltwirkungen. Um diese Wechselwirkungen genauer zu untersuchen ist in Abbildung 23 ein Ausschnitt von diesen mit dem Fokus auf die Betriebsphase B6 zu sehen. Die Abkürzung EF kennzeichnet darin gesondert die Zugehörigkeit zu den definierten Einflussfaktoren.

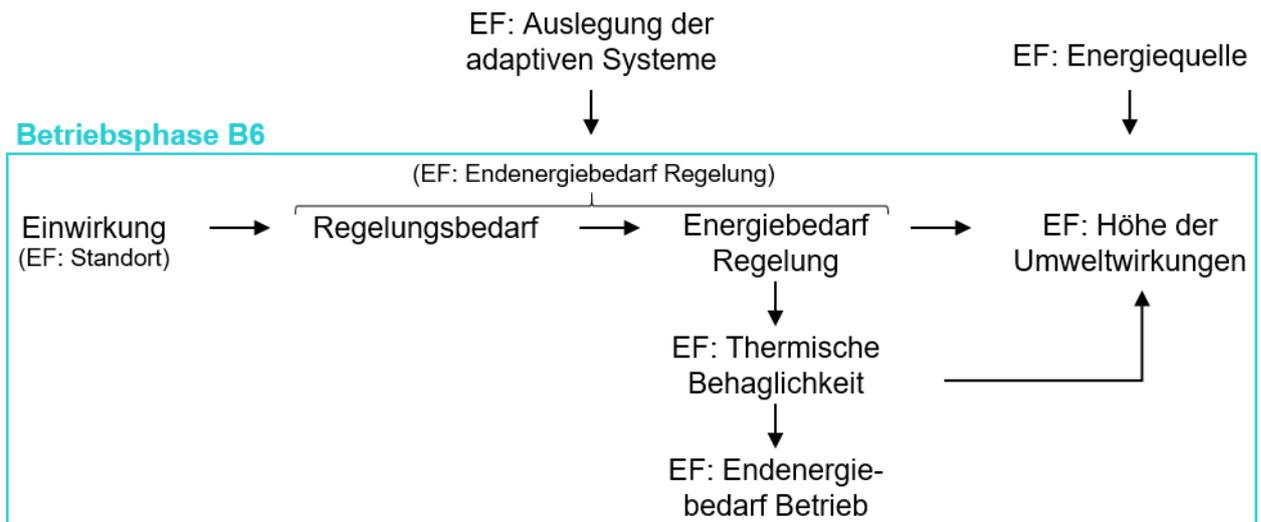


Abbildung 23: Ausschnitt aus den Wechselwirkungen in der Betriebsphase adaptiver Gebäude

Ein auftretender Lastfall wirkt auf das Gebäude. Diese Einwirkung ist in dem Einflussfaktor Standort enthalten. Die Einwirkung variiert durch die Art, der Eintrittswahrscheinlichkeit, der Dauer und der Stärke des Eintritts. Die Regelungseinheit erfasst dies und führt eine Aktuierung in Abhängigkeit der Regelstrategie durch. Dies ergibt einen Bedarf an resultierender Energie, woraus Umweltwirkungen entstehen. Je nach Untersuchungsgegenstand, wird der Endenergiebedarf des Betriebs indirekt über die thermische Behaglichkeit von dem Endenergiebedarf für die Regelung beeinflusst.

Aus der Planungsperspektive wird der Regelungsbedarf und Endenergiebedarf der Regelung am stärksten von der Auslegung der adaptiven Systeme beeinflusst. Das heißt, dass die Anpassung der adaptiven Systeme große Änderungen für den Endenergiebedarf der Regelung mit sich bringt. Im Kontext der Betriebsphase ist ebenfalls bedeutsam, dass die Höhe der Umweltwirkungen stark von der Energiequelle abhängt. Aus den aufgezeigten Wirkungen in Abbildung 23 fällt auf, dass die veränderlichen Einwirkungen auf das Gebäude in der Regel zu dynamischen Energieverbräuchen führen, die in Abhängigkeit stehen mit Parametern wie der Einwirkungsart oder der Regelstrategie der adaptiven Systeme.

4.6 Zwischenfazit der Systemuntersuchung

Aus der Systemuntersuchung adaptiver Gebäude und ihrer Umweltaspekte lassen sich einige Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen folgern, die in der Methodik

ActUate zu berücksichtigen sind. Diese werden zuerst vorgestellt und abschließend in Tabelle 3 zusammengefasst mit Handlungsempfehlungen für ActUate.

Die thermische Behaglichkeit hat, wie die Höhe der Umweltwirkungen, eine reaktive Rolle im System. Wenn Menschen sich nicht thermisch behaglich fühlen, ist die Funktionalität eines Gebäudes oder Raumes nicht gegeben. Deshalb ist die thermische Behaglichkeit in einzelnen oder allen Räumen als funktioneller Parameter in der Ökobilanz zu integrieren.

Wesentliche Veränderungen im Planungsprozess können durch die sieben schwarz umrandeten lenkbaren Einflussfaktoren in Abbildung 22 erreicht werden. Diese, die zudem direkt auf die Höhe der Umweltwirkungen wirken (Materialart, Energiequelle, Materialmenge, Auslegung des adaptiven Systems und der Einsatz der TGA), bieten großes Potential, um die Umweltwirkungen abschätzen und reduzieren zu können. Ebenso ermöglichen die Indikatoren im unteren Teil der Abbildung 22 mit direkter Wirkung auf die Höhe der Umweltwirkungen (Endenergiebedarf für den Betrieb und Regelung, Rezyklierfähigkeit und Instandhaltung) die Höhe der Umweltwirkung abzuschätzen und zu reduzieren. Diese Einflussfaktoren sind als Dateninput in ActUate zu integrieren.

Der Indikator der Lebensdauer hat eine reaktiv kritische Rolle im System und zudem einen direkten Einfluss auf die Höhe der Umweltwirkungen. Die Lebensdauer sollte daher direkt zu Beginn der Planung festgelegt werden, um komplexe Wechselwirkungen zu vermeiden. Dadurch können die restlichen Einflussfaktoren entsprechend ausgelegt werden.

Die Datenverfügbarkeit entlang des Planungsprozesses unterscheidet sich. Zu Beginn der Planung stehen nur wesentlichen Kriterien wie die Nutzungsart fest. Herausfordernd für ActUate ist der Umgang mit wenigen Daten zu Beginn der Planung. Eine Lösungsmöglichkeit sind Benchmarks. Benchmarks stehen in dieser Arbeit für Durchschnittswerte, durch die es gelingt, statistische Umweltwirkungen für definierte Gebäudetypen zu ermitteln. [110] Zu Planungsbeginn kann so mit geringen Daten eine statistische Auswertung über die potentiellen Umweltwirkungen getroffen werden. Grundlage für eine statistische Auswertung stellen bereits bilanzierte Gebäude dar.

Aus der Systemuntersuchung konnte ermittelt werden, wie sich das System adaptiver Gebäude, von dem konventioneller Gebäude, abgrenzt. In Abbildung 24 ist dargestellt, welche Veränderungen und Neuartigkeiten sich daraus für die Methode der Ökobilanz und damit für ActUate ergeben.

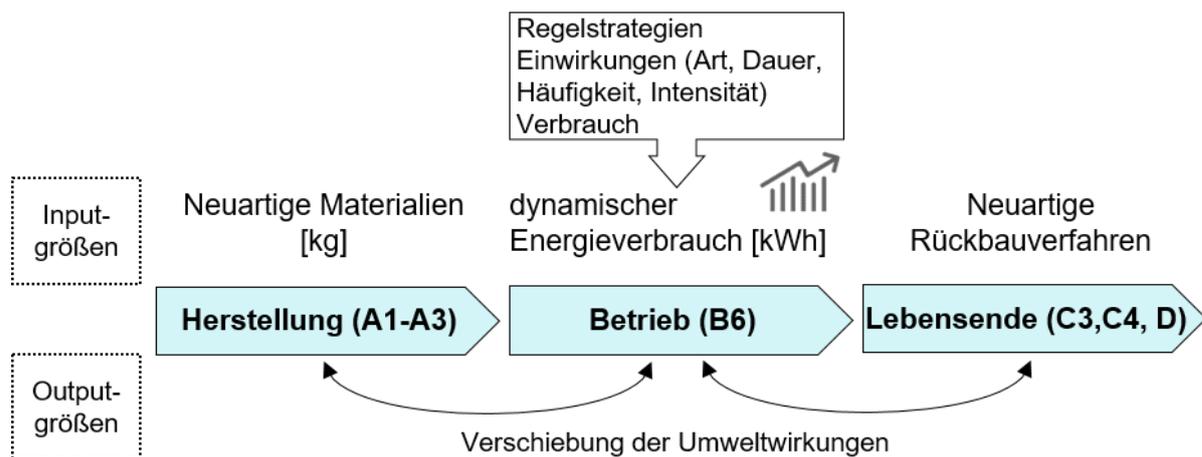


Abbildung 24: Veränderungen und Neuartigkeiten adaptiver Gebäude für die Ökobilanz

Zu sehen sind die drei wesentlichen Lebenszyklusphasen der Herstellung, des Betriebs und des Lebensendes. Die zwei neuen Einflussfaktoren (Endenergiebedarf zur Regelung und Auslegung des adaptiven Systems), die durch adaptive Gebäude hinzukommen, gehen in die Ökobilanz als neue Inputgrößen ein. Die Auslegung der adaptiven Systeme ergeben in Bezug auf konventionelle Gebäude neue Material- und Energieinputs für die Herstellungsphase und neuartige Rückbauverfahren für das Lebensende. In den Betrieb (B6) ordnet sich zukünftig der Energieverbrauch der Regelung ein. In B6 entsteht ein dynamischer Energieverbrauch, der von einigen Parametern, wie der Einwirkungsart und –häufigkeit, abhängig ist. Dadurch ergibt sich ein dynamischer Energieverbrauch für die Regelung, der zusätzlich noch in indirekter Wechselwirkung mit dem Energieverbrauch für den Betrieb steht. Wichtig ist hier, die Parameter zu identifizieren, die zu einem dynamischen Endenergiebedarf führen. Diese Parameter ermöglichen eine gezielte Darstellung und Szenariobildung der Umweltwirkungen des adaptiven Gebäudes. Bei den Outputgrößen ist zu sehen, dass sich im Vergleich zu konventionellen Gebäuden die Umweltwirkungen zwischen den Lebenszyklusphasen verschieben können. Ob und in welche Richtung dies möglich ist, hängt von der Wahl des adaptiven Systems ab. Bei passiv adaptiven Systemen ist keine Verschiebung zu erwarten, eher, eine Erhöhung der

Herstellung und des Lebensendes und eine Verringerung des Betriebs B6. Aktiv adaptive Systeme können durch einen erhöhten Endenergiebedarf eine Verschiebung von der Herstellung und dem Lebensende in die Nutzung bringen. Das Ziel bei der Entwicklung adaptiver Gebäude ist wie in Abbildung 25 dargestellt, die Umweltwirkungen – und in dem Beispiel die Treibhausgasemissionen – über den gesamten Lebenszyklus weiter zu senken und nicht nur eine Verschiebung der Umweltwirkungen zu erreichen. Dieses Ziel gilt es, mit ActUate zu verfolgen. Abbildung 25 zeigt die schematische Einordnung adaptiver Gebäude in die Gegenüberstellung aus Abbildung 1 in Kapitel 1. [111]

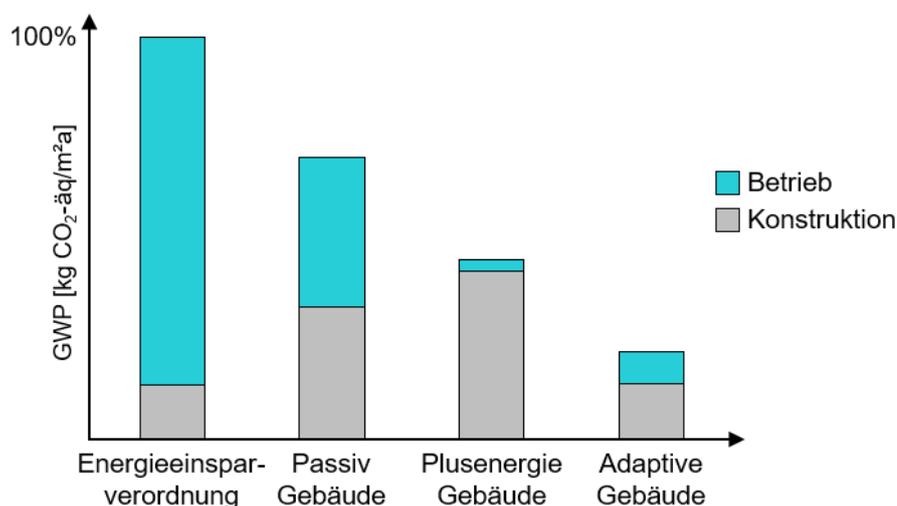


Abbildung 25: Treibhauspotential (GWP) verschiedener Gebäudevarianten aufgeteilt in Konstruktion und Betrieb in Anlehnung an [111]

Mit dem aktuellen Dateninput für konventionelle Gebäude ist es, wie in Abbildung 24 beschrieben, nicht möglich adaptive Gebäude allumfassend darzustellen. Mit der Datenverfügbarkeit für adaptive Gebäude muss somit in veränderter Weise umgegangen werden, was in Abbildung 26 dargestellt ist.

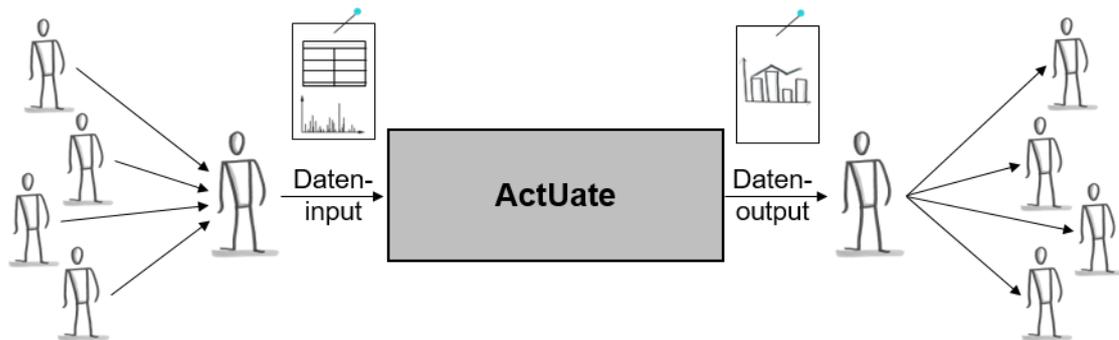


Abbildung 26: Datenverfügbarkeit bei der Ökobilanz adaptiver Gebäude

Im Vergleich zu konventionellen Gebäuden ergeben sich aus der Zunahme der Stakeholderinnen am Planungsprozess und den damit zusammenhängenden unterschiedlichen Datengrundlagen eine deutlich gesteigerte Datenkomplexität. Diese Komplexität steigert sich weiter durch die Unsicherheiten der eintretenden Einwirkungen auf das Gebäude und der damit zusammenhängenden variablen Energiebedarfe in der Nutzungsphase. Hierdurch entsteht ein dynamischer Energiebedarf pro geplantes adaptives System. Um die variablen Daten der unterschiedlichen Stakeholderinnen geordnet in ActUate einbringen zu können, sollte dafür eine zentrale Person, wie die Planerin, zuständig sein. Diese muss sich hierfür mit den verschiedenen Beteiligten des Planungsprozesses austauschen. Bei einem adaptiven Tragwerk hieße das beispielweise, Informationen von der Tragwerksplanung über das Tragwerk zu erhalten, vom Maschinenbau über die Komponenten des adaptiven Systems und von der Systemdynamik über deren Endenergiebedarf. Dieses komplexe Datengebilde muss anschließend in strukturierter Form von der Planerin an die Ökobilanzexpertin weitergegeben werden. Dazu eignen sich zum einen eine tabellarische Übermittlung der materiellen, statischen Bestandteile und zum anderen eine dynamische Datengrundlage des Endenergiebedarfs. In ActUate muss es dann möglich sein, sowohl die materiellen Bestandteile als auch die dynamischen Endenergiebedarfe zu verwerten. Die Parameter, die zu dem dynamischen Endenergiebedarf führen, wie die Regelungsstrategie, werden dabei definiert. Am Ende der Anwendung sind die Ergebnisse wieder an die Planerin und das Planungsteam zu übermitteln und dabei auch die vorhandene Dynamik mit aufzuzeigen.

Die Erkenntnisse der Systemuntersuchung sind in Tabelle 3 zusammenfassend dargestellt. Zudem werden konkrete Handlungsempfehlungen für ActUate abgeleitet. Die Nummerierung von A bis H stellt die Reihenfolge der vorangegangenen Herleitung, aber keine Gewichtung dar. Handlungsempfehlung A bezieht sich auf die Erweiterung der funktionellen Einheit. B und C formulieren Empfehlungen für die frühzeitige Festlegung von Einflussfaktoren im Planungsprozess. In D werden

Benchmarks als Datengrundlage früher Planungsphasen vorgesehen. Außerdem sind in E neue Größen definiert, die als Dateninput in die Sachbilanz adaptiver Gebäude einfließen müssen. Durch die potentielle Verschiebung der Umweltwirkungen gewinnt der Endenergiebedarf an Bedeutung, was in F und G aufgegriffen wird. Abschließend ist in H die Handlungsempfehlung einer strukturellen Datenerfassung formuliert. A, B und C sind somit übergreifende methodische Handlungsempfehlungen, die so auch für konventionelle Gebäude gelten können. Wiederum beschäftigen sich D bis H mit Erkenntnissen und Handlungsempfehlungen im Bereich des Dateninputs und -outputs adaptiver Gebäude. Diese stellen eine der größten Herausforderungen im Umgang mit der Abschätzung der Umweltwirkungen dar und sind für ActUate entsprechend aufzubereiten.

Tabelle 3: Zwischenfazit der Systemuntersuchung

Erkenntnis aus der Systemuntersuchung	Handlungsempfehlung
A Die thermische Behaglichkeit ist als Funktion eines Raumes erforderlich.	Die thermische Behaglichkeit sollte in der funktionellen Einheit von Räumen definiert werden.
B Die baurechtlichen Rahmenbedingungen, die Nutzungsart und der Standort haben viele direkte Einwirkungen auf andere Einflussfaktoren.	Diese drei Einflussfaktoren müssen direkt zu Beginn der Planung festgelegt und eingehalten werden.
C Die lenkbaren Einflussfaktoren sowie die Parameter mit direkter Wirkung auf die Höhe der Umweltwirkungen sind geeignete Datengrößen zur Abschätzung und Reduzierung der Umweltwirkungen. Die Lebensdauer hat darüber hinaus viele Wechselwirkungen im System.	Die Einflussfaktoren sind im Dateninput von ActUate vorzusehen. Die Lebensdauer ist direkt zu Beginn als Nutzungsdauer festzulegen.
D Die Datenverfügbarkeit direkt zu Beginn der Planung ist sehr gering.	Für die frühen Planungsphasen kann durch Benchmarks Umweltwirkungen abzuschätzen.

<p>E Neuartige Materialien müssen für die Herstellung und das Lebensende berücksichtigt werden. Der Endenergiebedarf B6 wird durch den für die Regelung erweitert.</p>	<p>Diese Größen sind als neue Dateninputs in der Ökobilanz zu berücksichtigen.</p>
<p>F Die Einwirkungen auf das Gebäude können zu dynamischen Energieverbräuchen führen und damit zu einer schwer erfassbaren Datengrundlage in der Betriebsphase.</p>	<p>Aus dem Dateninput des dynamischen Endenergiebedarfs in der Betriebsphase müssen die wesentlichen Parameter der Unsicherheiten identifiziert, untersucht, abgebildet und kommuniziert werden.</p>
<p>G Bei aktiv adaptiven Systemen kann der Endenergiebedarf aufgrund seiner Höhe eine entscheidende Rolle in den gesamten Umweltwirkungen spielen. Die Umweltwirkungen der Energie hängen stark von der Energiequelle ab.</p>	<p>Das Umweltprofil der Betriebsenergie ist hinsichtlich ihrer Bereitstellung zu untersuchen und bereits im Dateninput zu fokussieren.</p>
<p>H Die veränderte Zusammensetzung der Stakeholder am Planungsprozesse, sowie der Anteil an statischen wie auch dynamischen Dateninput ergibt eine komplexe Datenstruktur.</p>	<p>Es ist ein geordneter Dateninput für die Erstellung der Sachbilanz nötig.</p>

5 Methodik zur Abschätzung von lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen im Planungsprozess adaptiver Gebäude (ActUate)

In Kapitel 5 wird die Methodik ActUate hergeleitet und zunächst in einem ersten Schritt ihre Struktur erläutert (Kapitel 5.1), um ein Verständnis für das weitere Vorgehen zu erlangen. Im Anschluss erfolgt eine schrittweise Beschreibung der Methodik. Den Abschluss bilden eine Zusammenfassung und ein Fazit zu ActUate. Darin wird unter anderem Bezug genommen, in welcher Weise die Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen der Systemuntersuchung in Tabelle 3 in die Methodik umgesetzt wurden.

ActUate baut auf der Methode der Ökobilanz auf. Nachfolgend werden daher die Inhalte der DIN EN ISO 14040 [29], DIN EN ISO 14044 [30] und DIN EN 15978 [26] als gegeben vorausgesetzt.

5.1 Struktur der Methodik ActUate

Die Vorgehensweise der Methodik ActUate umfasst fünf Schritte, welche in Abbildung 27 dargestellt sind. Die Schritte zwei bis fünf orientieren sich an der klassischen Ökobilanz und werden durch die zeitliche Einordnung in den Planungsprozess adaptiver Gebäude zu Beginn ergänzt. Die Doppelpfeile zwischen den einzelnen Schritten symbolisieren die iterative Vorgehensweise von ActUate. Die Nummerierung der Schritte entspricht, neben der Vorgehensweise der Methodik, gleichzeitig der Abfolge des Kapitels und wird nachfolgend beschrieben.

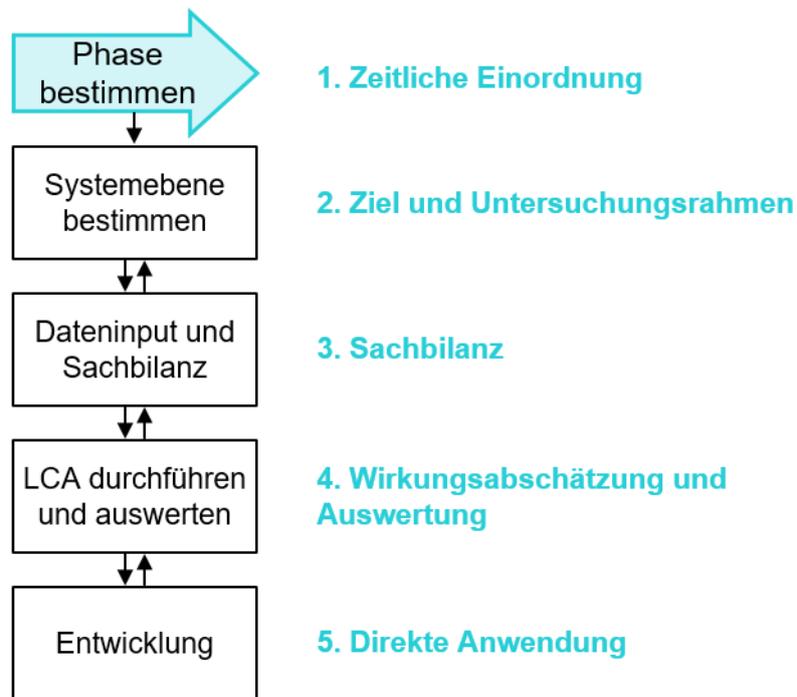


Abbildung 27: Struktur der Methodik ActUate

5.2 Zeitliche Einordnung

Im ersten Schritt wird die Methodik ActUate in den Planungsprozess adaptiver Gebäude zeitlich eingeordnet. Diese Einordnung wurde in einem Workshop hergeleitet und in [111] veröffentlicht. In diesem Workshop wirkten neben der Autorin zwei Expertinnen aus dem Bereich der Planungsphasen adaptiver Gebäude mit. Im Workshop wurde auf Basis des Planungsprozesses in Kapitel 2.1.2 erarbeitet, wann welche Informationen im Planungsprozess vorliegen, wann in Abhängigkeit davon Umweltwirkungen abgeschätzt werden können und die Ergebnisse darüber hinaus einen Mehrwert im Planungsprozess mit sich bringen.

Im unteren Bereich von Abbildung 28 sind vier verschiedene Phasen für die zeitliche Einordnung festgelegt. Die Abbildung orientiert sich an dem in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Planungsprozess für adaptive Tragwerke. Die erste bis dritte Phase wird prospektiv und die vierte Phase retrospektiv durchgeführt. Wie in [74] beschrieben, ist ein vergleichbarer zeitlicher und struktureller Planungsablauf für adaptive Gebäudehüllen zu erwarten. Um ActUate weitreichend und umfassend anwenden zu können, wird die Methodik auf die Abschätzung der Umweltwirkungen des gesamten adaptiven Gebäudes ausgelegt. Die Fassadenplanung erweitert im oberen Bereich

der Abbildung die dargestellten Fachdisziplinen. Neben dieser sind in einem zukünftigen Planungsprozess adaptiver Gebäudehüllen weiterhin Fachdisziplinen wie die Bauphysik zu berücksichtigen.

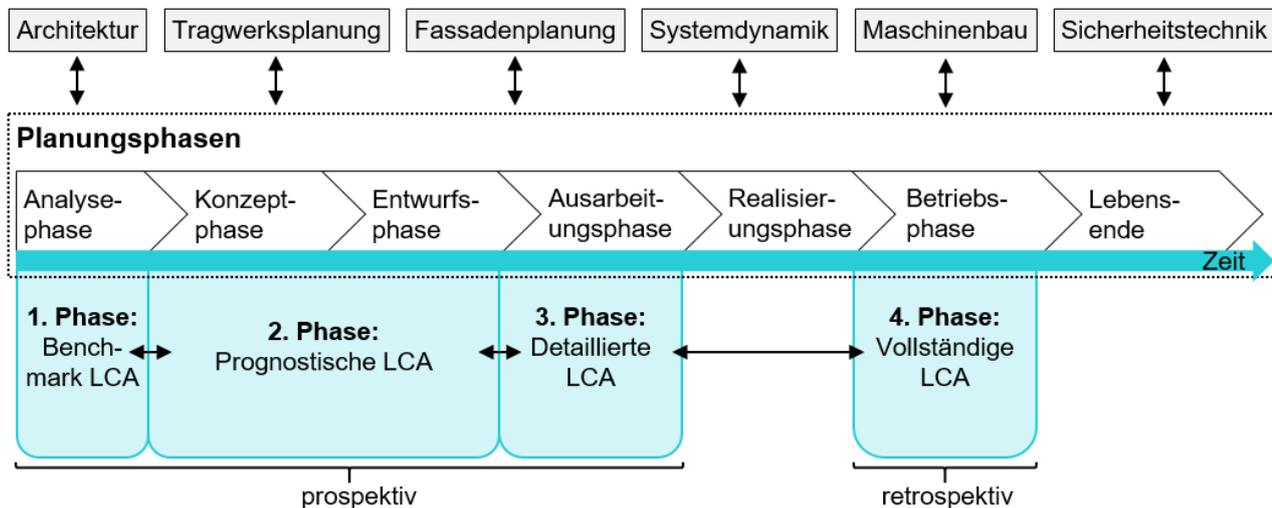


Abbildung 28: Zeitliche Einordnung der Methodik in den Planungsprozess adaptiver Gebäude in Anlehnung an [111]

Die erste Phase (Benchmark LCA) wird in die Analysephase integriert. In dieser legt vor allem die Architektur die grundlegenden Rahmenbedingungen, wie die Nutzungsart, fest. Auf Basis weniger Informationen werden in ActUate über Bottom-Up Benchmarks, in Form von Durchschnittswerten, Abschätzungen zu den zukünftigen Umweltwirkungen getroffen.

Die zweite Phase (prognostische LCA) von ActUate ist während der Konzept- und Entwurfsphase angesetzt. Hier werden verschiedene Varianten entworfen und daraus wird eine Konzeptauswahl mit definierten Komponenten abgeleitet. Auf Basis von abgeschätzten Informationen zu den Entwürfen können prognostische Ökobilanzen durchgeführt werden. Diese haben nicht den Charakter einer ausführlich ausgearbeiteten Ökobilanz, sondern ermöglichen grobe Abschätzungen über Änderungen in frühen Phasen.

In der konkreter werdenden Ausarbeitungsphase kommt es zu einer detaillierten Abschätzung der Umweltwirkungen, bei der auf detaillierte Berechnungen aller Komponenten und Ausführungspläne zurückgegriffen wird. Die Komponenteninformationen sind ausreichend ausgearbeitet, um detaillierte Abschätzungen durch ActUate vornehmen zu können. Gleichzeitig sind zu diesem Zeitpunkt noch Möglichkeiten

vorhanden, die Komponenten konstruktiv anzupassen, um die Umweltwirkungen zu verringern. Lediglich die dynamischen Werte der Betriebsphase können in dieser Phase noch sehr variabel und unsicher sein. [111] Sowohl die zweite als auch die dritte Phase sind bei der Anwendung von ActUate wichtig. Die zweite Phase erlaubt eine grobe Abschätzung mit viel Entscheidungsmöglichkeiten, während in der dritten Phase genauere Umweltwirkungen berechnet werden können jedoch die Möglichkeiten der Veränderungen nicht mehr so groß sind.

Wenn die Planung abgeschlossen und das Gebäude in der Betriebsphase ist, wird eine vollständige Abschätzung durchgeführt. An dieser Stelle können alle Informationen der bis dahin aufgewendeten Ressourcen erfasst werden und für die Betriebsphase gibt es erste Messwerte. [111] Neben der Beachtung neuer Inputgrößen, kann in der vierten Phase eine Ökobilanz nach DIN EN 15978 [26] durchgeführt und ausführlich dokumentiert werden.

Die Planerin gibt daher zu Beginn der Anwendung von ActUate grundlegende Rahmenbedingungen über das Bauprojekt an die Ökobilanzexpertin, auf deren Basis diese die zeitliche Einordnung vornehmen kann. Die Einordnung in die vier Phasen von ActUate hängt nicht allein von dem Planungsstand in Abbildung 28 ab, sondern ebenso vom Untersuchungsrahmen und der vorhandenen Datenlage des betrachteten Untersuchungsgegenstandes, welche in Kapitel 5.3 und 5.4 vorgestellt werden. Wird ein Untersuchungsgegenstand zu einem späten Planungszeitpunkt mit dem Untersuchungsrahmen und Dateninput einer früheren Planungsphase durchgeführt, ist in ActUate die frühere Phase zu wählen. Dies bedeutet, dass beispielsweise die zweite Phase von ActUate zu wählen ist, wenn in der Ausführungsphase ein neues Konzept einer Fassade entworfen wird.

Die zeitliche Einordnung in den Planungsprozess ist iterativ. Das heißt, dass die vier Phasen nicht stringent von der ersten bis zur vierten Phase durchlaufen werden müssen, sondern nach der dritten Phase beispielsweise auch eine Abschätzung in der zweiten Phase möglich ist. Zudem ist es möglich, in einer Phase mehrmals eine Abschätzung durchzuführen. Die Abschätzung von ActUate in allen vier Phasen ist sinnvoll, um Umweltwirkungen zu reduzieren, aber nicht nötig für die Funktionalität der Methodik.

5.3 Ziel und Untersuchungsrahmen

Nach der zeitlichen Einordnung im Planungsprozess, kann das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt werden. Das Ziel ist durch die Planerin klar zu formulieren, damit die Ökobilanzexpertin den Untersuchungsrahmen passend auslegen und die Datengrundlage richtig erfassen kann. Ist die Zielstellung durch die Ökobilanzexpertin nicht erfüllbar, wird gemeinsam mit der Planerin eine Anpassung der Zielstellung vorgenommen. Für die Definition des Untersuchungsrahmens sind in ActUate verschiedene Rahmenbedingungen festzulegen, welche nachfolgend erklärt werden.

Als erstes wird der Untersuchungsrahmen anhand der Systemebene beschrieben. Wie in Tabelle 4 zu sehen ist, ergeben sich die Systemebenen aus der zuvor festgelegten zeitlichen Einordnung. In der ersten Spalte befindet sich die zeitliche Einordnung aus Kapitel 5.2 und in der zweiten Spalte die dazugehörige Systemebene. Die Bedeutung der verschiedenen Systemebenen ist in der dritten Spalte definiert. Das heißt zum Beispiel, dass bei der Anwendung von ActUate in der 1. Phase stets die Gebäudesystemebene, also das Gebäude als Ganzes, betrachtet wird.

Tabelle 4: Definition der Systemebenen in ActUate

Zeitliche Einordnung	Systemebene	Definition
1. Phase: Benchmark LCA	Gebäudesysteme- ebene	Das Gebäude wird als Einheit betrachtet. Eine Auflösung in einzelne Bestandteile findet nicht statt.
2. Phase: Prognostische LCA	Funktionssysteme- ebene	Teile des Gebäudes, die eine eigenständige Funktion erfüllen. Beispiele sind das Tragwerk oder die Gebäudehülle.
3. Phase: Detaillierte LCA	Komponentensysteme- ebene	Ein Gebäude besteht aus einzelnen Komponenten, also Bestandteilen, die als Ganzes die Gebäudesystemebene darstellen. Komponenten sind zum Beispiel nicht-tragende Fassaden oder Gebäudedecken.
4. Phase: Vollständige LCA	Gesamtsystemebene	Die Gesamtsystemebene ist das vollständige Gebäude, das sich aus allen Komponenten inklusive seiner Funktionen zusammensetzt.

In Abbildung 29 sind die verschiedenen Systemebenen der entsprechenden Phase aus Tabelle 4 dargestellt. Unterhalb der Systemebenen sind eine oder mehrere Subsysteme zu sehen, die je nach vorgegebenen Untersuchungsgegenstand für die Abschätzungen gewählt werden. Diese können sich sowohl auf adaptive wie auch konventionelle Gebäude oder Komponenten beziehen. Bei adaptiven Komponenten müssen die integrierten adaptiven Systeme mit beachtet werden.

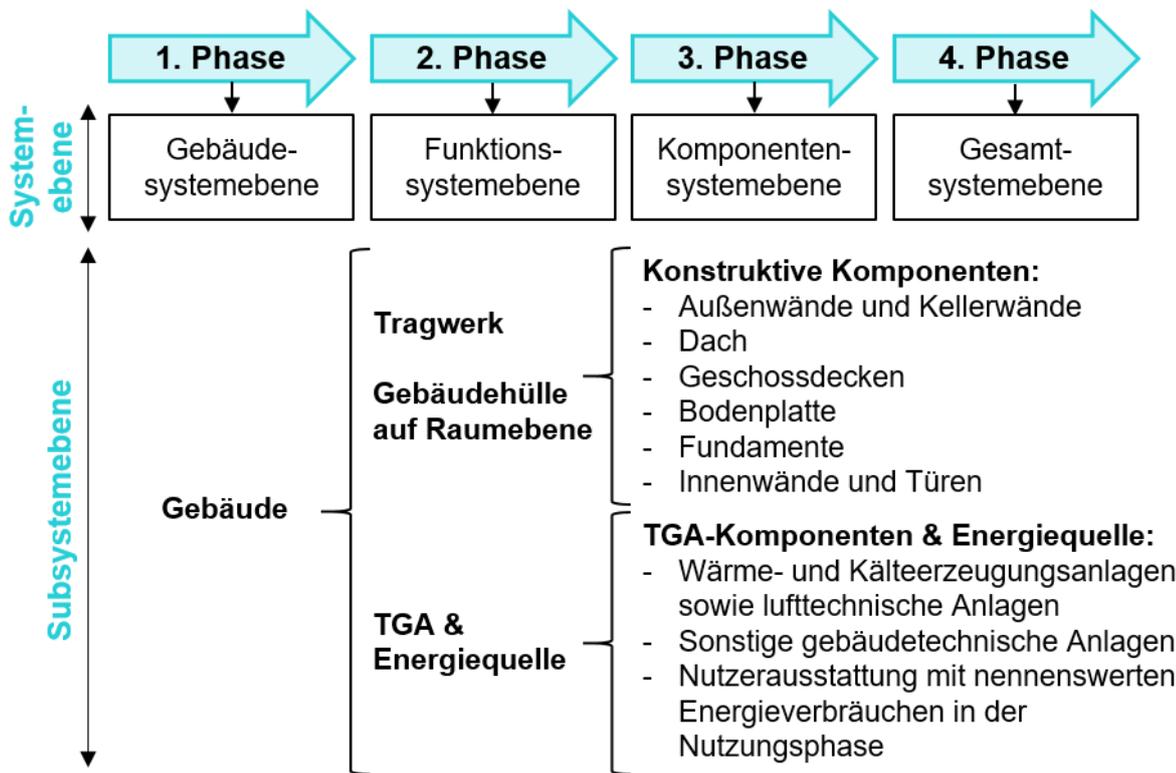


Abbildung 29: Systemebenen und Subsystemebenen der Methodik ActUate

Die Gebäudesystemebene wird nicht weiter aufgeteilt, so dass es mit dem Gebäude eine mögliche Systemebene gibt.

Bei der Funktionssystemebene kann zwischen dem Tragwerk, der Gebäudehülle sowie der TGA und der Energiequelle unterschieden werden. Die Gebäudehülle kann entweder als Kombination aus Dach und Fassade oder einer getrennten Betrachtung, also dem Dach oder der Fassade, erfolgen. Der Untersuchungsrahmen einer Gebäudehülle wird immer durch die Raumebene ergänzt. Die Raumebene umfasst den konstruktiven und betrieblichen Raum hinter der Gebäudehülle. Die Raumebene zu bedenken ist wichtig, um deren Funktionsweise und Wirkungen auf den Raum zu beachten. Wird die Raumebene nicht mitbetrachtet, sind mögliche Verschiebungen der Umweltwirkungen nicht zu sehen, zum Beispiel von der Konstruktion zum Betrieb. Die thermische Behaglichkeit gilt auf Raumebene zudem als funktionelle Voraussetzung. Wenn ein Variantenvergleich von Gebäudehüllen durchgeführt wird, müssen diese zudem die gleiche adaptive Funktion erfüllen. Die folgenden adaptiven Funktionen für Gebäudehüllen basieren auf [67]:

- Licht- und strahlungsadaptive Gebäudehülle
- Wärmeadaptive Gebäudehülle
- Feuchteadaptive Gebäudehülle
- Akustisch-adaptive Gebäudehülle
- Kombination aus den genannten Gebäudehüllen

In der Komponenten- und Gesamtsystemebene wird in konstruktive Komponenten für das Tragwerk und die Gebäudehülle sowie in TGA Komponenten und Energiequellen unterschieden. In Abbildung 29 ist die entsprechende Aufteilung dargestellt. Diese orientiert sich an der Aufteilung der DGNB [23]. In Anlehnung an die Systemgrenzen der DIN EN 15804 [25], müssen sich Komponenten in ihrer Systemebene so zusammensetzen, dass eine vollständige Funktion erfüllt wird. Das heißt, dass verschiedene Komponenten für die Abschätzung zu kombinieren sind, so dass eine Funktionssystemebene erfüllt wird.

Desweiteren muss für die Definition des Untersuchungsrahmens eine Systemgrenze festgelegt werden. Die Wahl der Systemgrenzen in ActUate umfasst den kompletten Lebenszyklus. Wenn die Datengrundlage nicht für den kompletten Lebenszyklus zur Verfügung steht, sind mindestens die Daten aus den Lebenszyklusphasen der Herstellung (A1 bis A3), des Betriebs (B6) und dem Lebensende (C3, C4) abzubilden. Im Bereich des GWP sind bei konventionellen Gebäuden die Phasen A1 bis A3 sowie B6 die, die den größten Anteil der Umweltwirkungen ausmachen [18, 58, 97]. C3, C4 sind nötig, um die Rezyklierfähigkeit abzubilden. Durch die hohe Anzahl an technischen Komponenten bei adaptiven Gebäuden ist spätestens ab dem Detaillierungsgrad der dritten Phase die Lebenszyklusphase des Austauschs (B4) mit zu berücksichtigen.

Für die Festlegung der funktionellen Einheit des Untersuchungsrahmens wird abhängig von der Systemebene die Bezugseinheit m^2a gewählt. Die weiteren Annahmen zur Berechnung nach Norm, wie zum Beispiel die Beschreibung des zu untersuchenden Produktsystems und Anforderungen an die Daten, sollen nach ISO 14040 [29] und ISO 14044 [30] umgesetzt werden.

Für die Berechnung in ActUate ist eine konsistente und kompatible Datenbank auszuwählen. Die Datenbank muss den Strukturen und Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die Kompatibilität mit der Methode der Ökobilanz, von ActUate entsprechen und die Anforderungen aus Kapitel 3.1 erfüllen.

Durch die Neuartigkeit der adaptiven Gebäude gibt es derzeit noch keine vollständigen Ökobilanzen von adaptiven Gebäuden, die für die Erstellung von Benchmarks in der ersten Phase notwendig sind. Bis eine Datenbank aufgebaut werden kann, kann auf Datenbanken von Zertifizierungssystemen zurückgegriffen werden. Die dort abgebildeten Gebäude besitzen in der Regel einen hohen ökologischen Standard und sind daher als Ausgangsbasis für adaptive Gebäude geeignet [112]. Damit diese Datenbanken zur Anwendung kommen können, müssen jedoch noch einige Standardisierungen und Anpassungen durchgeführt werden. Die Grundlage dafür wurde in [112] erarbeitet, in dem Handlungsempfehlungen formuliert sind, wie eine derartige Datenbank aufgebaut sein muss. Beispielsweise ist ein automatisierter Qualitätscheck der Ökobilanzergebnisse durchzuführen, um sicherzustellen, dass die Ökobilanzergebnisse vollständig und korrekt sind. In Tabelle 5 ist dargestellt, wie die Umweltwirkungen (in der Tabelle auch UW) pro Gebäude gesammelt oder geordnet werden müssen, um zukünftig Benchmarks bilden zu können. Der Detaillierungsgrad der Lebenszyklusphasen hängt von der Detaillierung der Ergebnisse ab, muss aber mindestens die zuvor beschriebenen Lebenszyklusphasen (A1 bis A3, B6, C3, C4) beinhalten. Für die Erstellung aussagekräftiger Benchmarks müssen für die Gebäude weitere Informationen, wie die Nutzungsart, vorliegen. Die notwendigen Informationen werden in Kapitel 5.4 als Dateninput hergeleitet.

Tabelle 5: Notwendige Datenstruktur für die Benchmark LCA der ersten Phase in ActUate

Gebäude	Umweltwirkung 1 [UW/m ² a]			...
	A1-A3	B6	C3-C4	...
1
2
...

Für die zweite bis vierte Phase ist eine Datenbank auszuwählen, die genügend Daten für die Anwendung der Methodik ActUate besitzen. Die Datenbanken im Bauwesen, wie zum Beispiel die ÖKOBAUDAT [12], verfügen aktuell nur über wenige Daten zur Bilanzierung adaptiver Systeme. Um sowohl adaptive Systeme als auch bauspe-

zifische Materialien abbilden zu können, muss teilweise mit verschiedenen Datenbanken gerechnet werden. Bei der Kombination verschiedener Datensätze ist darauf zu achten, dass diese kompatibel sind, also die Datenqualität und -struktur vergleichbar sind [37].

5.4 Dateninput und Sachbilanz

Die Erstellung der Sachbilanz umfasst die Datenerhebung, Datenberechnung und Allokation. Der Dateninput wird über zwei Wege hergeleitet. Zum einen ergeben sich aus der Systemuntersuchung in Kapitel 4 alle notwendigen Einflussfaktoren. Dazu wurden in Kapitel 4.6 in den Handlungsempfehlungen B, C und E verschiedene notwendige Dateninputs definiert. Zum anderen basiert die Herleitung des Dateninputs aus dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Workshop für die zeitliche Einordnung, welche in [111] veröffentlicht wurde. In dem Workshop wurde aufbauend zu den vier definierten Phasen die Datengrundlage definiert, die für eine Abschätzung von Umweltwirkungen vorhanden sein muss. In Abbildung 30 ist auf Basis der definierten Systemebenen der nötige Dateninput pro Phase abgebildet. Der schwarze Pfeil auf der linken Seite symbolisiert, dass die Dateninputs der vorherigen Phasen zusätzlich in den nachfolgenden Phasen benötigt werden. Die Fläche wird zum Beispiel neben der ersten Phase auch für die zweite, dritte und vierte Phase notwendig. Einzig das Adaptionlevel in der ersten Phase ist für nachfolgende Phasen nicht mehr erforderlich, da dieses später detaillierter über die Regelendenergie erfasst wird.

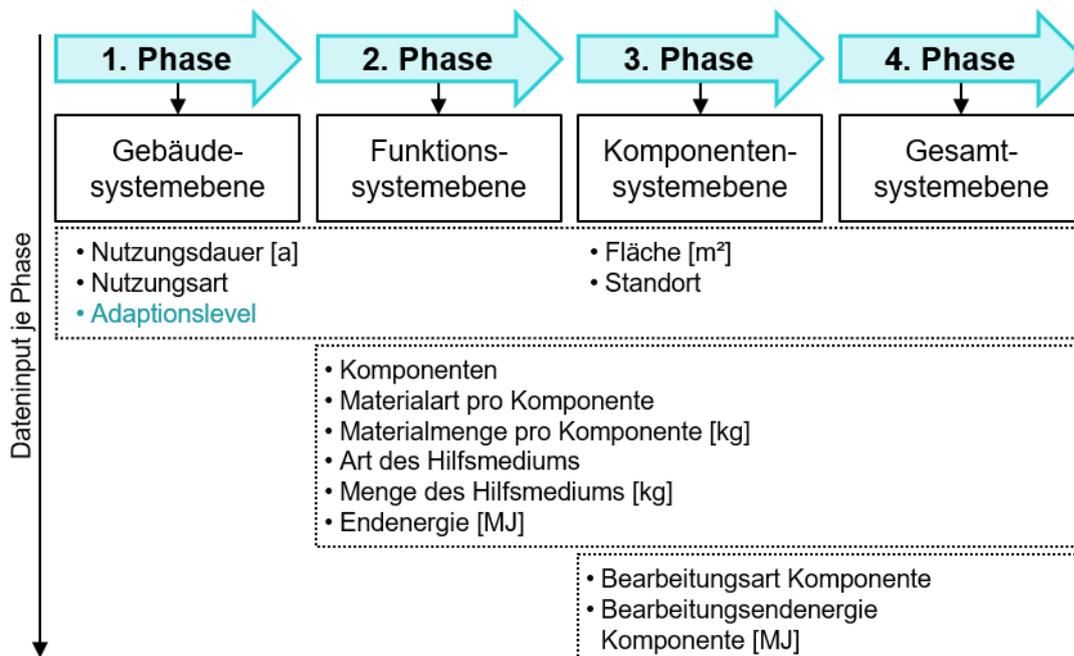


Abbildung 30: Dateninput pro Planungsphase der Methodik ActUate

In der ersten Phase werden die dargestellten Dateninputs benötigt, um aussagekräftige Benchmarks zu berechnen. Die Nutzungsdauer und Fläche werden in m² und a erfasst. Bei der Nutzungsart kann zwischen folgenden nach DGNB definierten Möglichkeiten unterschieden werden [23]:

- Büro
- Bildung
- Wohnen
- Hotel
- Verbrauchermarkt
- Shopping Center
- Geschäftshaus
- Versammlungsstätte
- Verbrauchermarkt
- Logistik
- Produktion

Die Auswahlmöglichkeiten des Standorts und des Adaptionslevels hängt von der Detaillierung der Datenbank ab. Beim Standort muss mindestens eine Einteilung in Klimaregionen (kalte Zone, gemäßigte Zone, Subtropen, Tropen) möglich sein, um die bauphysikalische Auslegung vergleichen zu können. Werden Standorte differen-

zierter eingeteilt, zum Beispiel in Städte, können aussagekräftigere Benchmarks gebildet werden. Beim Adaptionlevel muss auf Basis der Datengrundlage zum Endenergiebedarf für die Regelung eine statistische Bandbreite ausgewertet und definiert werden. Hier könnte zum Beispiel eine Einteilung in niedrig, mittel und hoch erfolgen. Aufbauend auf diesen Dateninputs können Benchmarks in der Datenbank ausgewertet werden. Die Datenübermittlung findet hier durch die Planerin statt, die die groben Rahmenbedingungen des Bauprojekts und damit den Dateninput der definierten Größen bekannt gibt.

Ab der zweiten Phase werden zu Beginn alle Komponenten des Untersuchungsgegenstandes erfasst, um für jede Komponente anschließend die Dateninputs zu Mengen in kg, Materialien und etwaigen Hilfsmedien zu benennen. Die Endenergie wird in MJ benötigt und teilt sich auf in Energie für den Betrieb (Heizen, Kühlen, Lüften, Beleuchtung und weitere nutzungsspezifische Mengen) und die Regelung. Die Bearbeitungen der Komponenten, wie zum Beispiel das Fräsen, sind Gegenstand für die dritte und vierte Phase. Dazu zählt ebenfalls die konstruktive Durchbildung zwischen einzelnen Komponenten. Informationen dazu sind auch notwendig, um den Austausch und das Recycling richtig darzustellen.

Die Datenübermittlung ab der zweiten Phase leitet sich aus der Handlungsempfehlung H ab, erfolgt im Planungsprozess im iterativen Austausch zwischen der Ökobilanzexpertin und der Planerin und lässt sich in zwei Bereiche einteilen. Die zu Beginn erfassten Komponenten ermöglichen der Ökobilanzexpertin, einen tabellenartigen Fragebogen zu erarbeiten, um alle notwendigen Daten, inklusive der Einheiten, bei der Planerin abzufragen. In diesem Fragebogen stellt die Planerin, im Austausch mit den jeweiligen Fachdisziplinen alle wichtigen materiellen Daten strukturiert bereit. Wenn der Dateninput nicht in der gewünschten Einheit vorliegt, rechnet die Ökobilanzexpertin ihn in die Einheit aus Abbildung 30 um. Neben der Bereitstellung des materiellen Dateninputs ist zudem der dynamische Endenergiebedarf zu übermitteln. Je nach Anwendungsfall lässt sich dies nicht immer in einer statischen Tabelle übermitteln. In diesen Fällen ist eine dynamische Weise zu wählen. Eine Möglichkeit ist in Abbildung 31 zu sehen. Hier wird die benötigte Arbeit über die Nutzungsdauer nach der jeweiligen Belastung, wie beispielsweise Wind, dargestellt. Wichtig ist, die dynamischen Endenergiebedarfe den einzelnen adaptiven Systemen zuzuordnen, da es bei mehreren adaptiven Systemen in einem Gebäude auch zu verschiedenen dynamischen Endenergiebedarfen kommen kann und dadurch die Datenkomplexität weiter steigt.

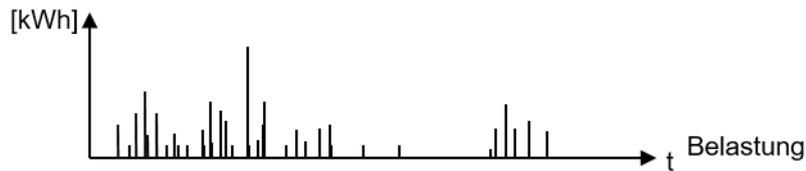


Abbildung 31: Datenübermittlung des dynamischen Endenergiebedarf von adaptiven Systemen

In den Handlungsempfehlungen F und G aus Kapitel 4 ist die besondere Stellung für den Dateninput von B6 identifiziert worden. Es bedarf einer gezielten Vorgehensweise ob, in welcher Art und in welchem Umfang der Dateninput des Endenergiebedarfs untersucht wird. Dafür sind für diese Handlungsempfehlungen je ein Flussdiagramm in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt.

Ausgangsbasis der Untersuchung des dynamischen Endenergiebedarfs ist der durch die Planerin ermittelte Wert für den Endenergiebedarf für die Regelung und den Betrieb.

Zu Beginn ist zu klären welchen Anteil der Endenergiebedarf aus B6 an den gesamten Umweltwirkungen (in der Abbildung UW) einnimmt. Dafür ist eine approximative Auswertung der Umweltwirkungen vorzunehmen. Ist der Anteil kleiner als 5 % ist keine weitere Untersuchung notwendig. In diesem Fall wird in der Sachbilanz der Dateninput auf Basis des ermittelten Werts mitberücksichtigt. Der Anteil von mindestens 5 % leitet sich aus der DIN EN 15804 [25] ab. In dieser ist definiert, dass maximal 5 % der Gesamtsumme an Input-Flüssen im Dateninput vernachlässigt werden darf. Auf Basis dieses Wertes wird angenommen, dass ein Dateninput von weniger 5 % keine signifikanten Veränderungen für das Gesamtergebnis mit sich bringt. Wenn der Anteil mindestens 5 % beträgt, wird im nächsten Schritt ermittelt, in welcher Phase von ActUate sich die Untersuchung befindet. In der vierten Phase ist keine weitere Untersuchung nötig, da der Endenergiebedarf nun gemessen werden kann. Wird in der ersten bis dritten Phase von ActUate untersucht, werden nun die Parameter identifiziert, die entscheidend für die Dynamik des Endenergieverbrauchs sind. Dafür sind die Einwirkungen (Art, Dauer, Häufigkeit, Intensität) und deren Wahrscheinlichkeiten, Regelstrategien sowie die Höhe des Verbrauchs ausschlaggebend. Die Identifikation der Parameter ist notwendig, um die grundlegenden Stellschrauben im dynamischen Endenergiebedarf zu erkennen und näher betrachten zu können. Auf Basis der Parameter wird im nächsten Schritt der

Dateninput auf seine Unsicherheiten untersucht. Um mit unsicheren Daten umzugehen, gibt es von der reinen Kommunikation bis hin zu analytischen Untersuchungen diverse Möglichkeiten. Die Thematik der Datenunsicherheit ist in Kapitel 2.3.2 aufbereitet und wurde unter anderem von Gantner [49] bearbeitet.

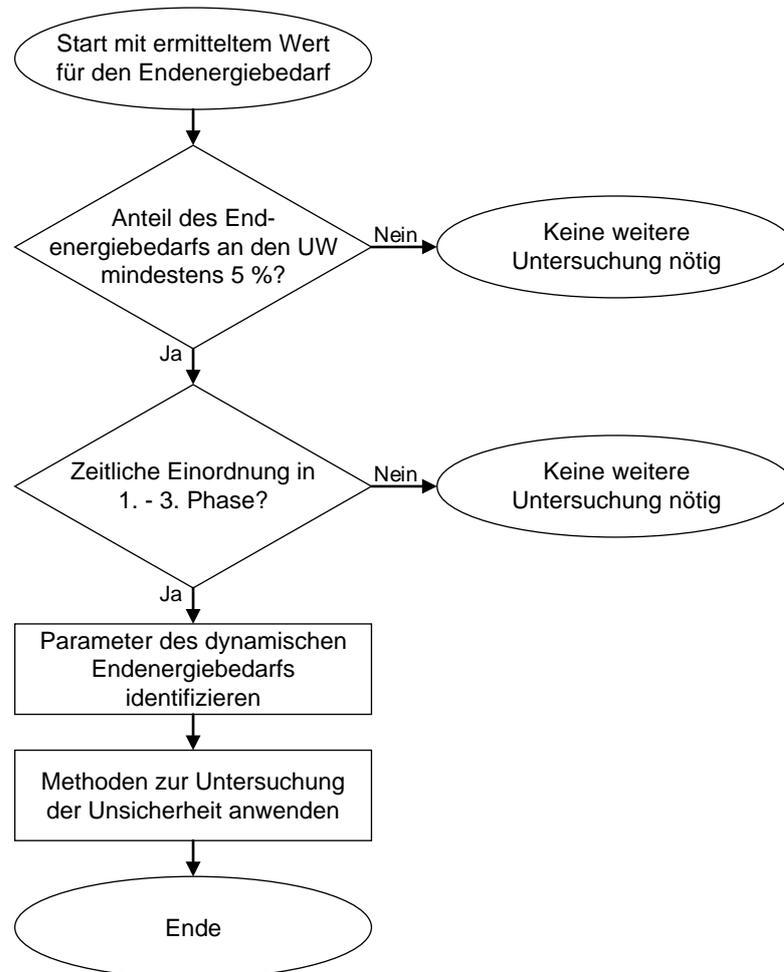


Abbildung 32: Flussdiagramm für den Umgang mit Dateninputs des dynamischen Endenergiebedarfs

In Abbildung 33 befindet sich die Darstellung, wie mit dem elektrischen Endenergiebedarf in B6 umzugehen ist. Ausgangspunkt ist der durch die Planerin ermittelte Wert für den elektrischen Endenergiebedarf der Regelung und des Betriebs.

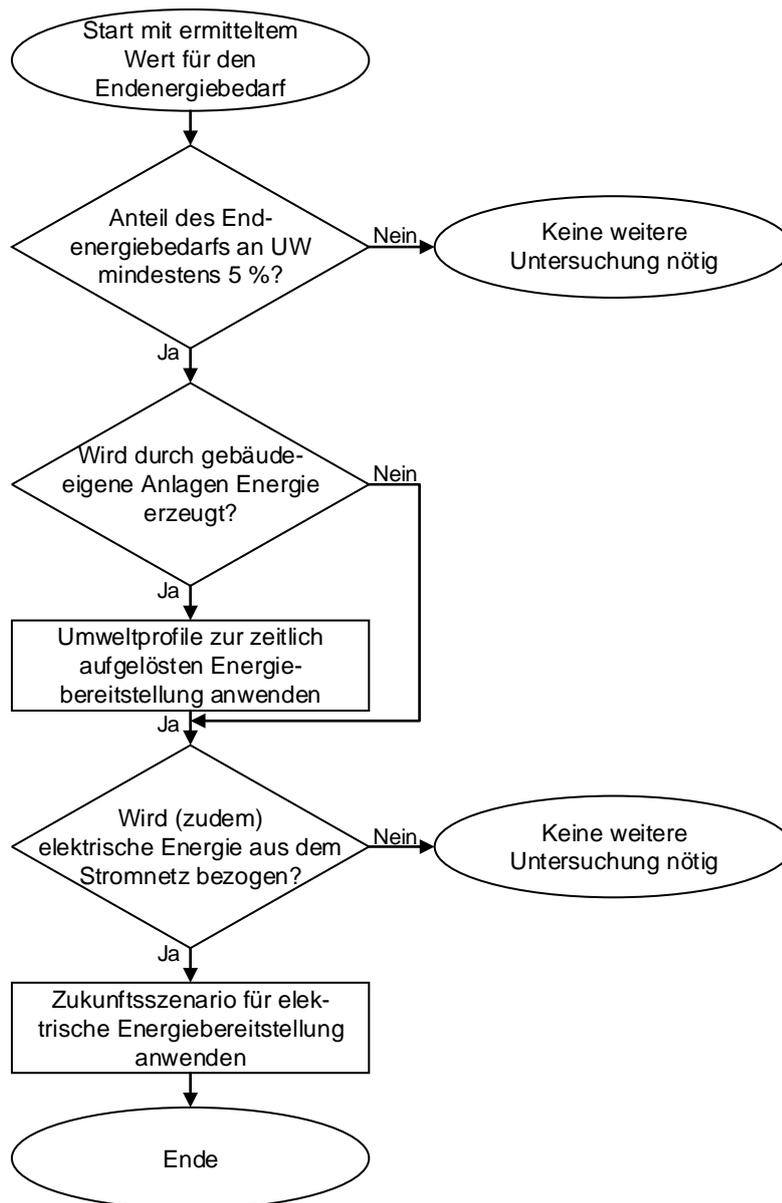


Abbildung 33: Flussdiagramm für den Umgang mit dem Umweltprofil des Endenergiebedarfs

Zu Beginn ist, wie auch in Abbildung 32 vermerkt, zu untersuchen wie hoch der Anteil des Endenergiebedarfs an den gesamten Umweltwirkungen (in der Abbildung UW) ist. Ist dieser kleiner als 5 %, ist keine weitere Untersuchung des Dateninputs notwendig. Wenn dieser mindestens 5 % einnimmt, wird ermittelt, ob zu der Systemgrenze eine gebäudeeigene Anlage gehört, mit der erneuerbare Energie erzeugt werden kann. Dabei ist es irrelevant, ob die erzeugte Energie für den Eigengebrauch ist oder in das Stromnetz eingespeist wird. Wenn eine gebäudeeigene Anlage vorhanden ist, soll eine zeitlich aufgelöste Energiebereitstellung in ActUate integriert werden. Eine mögliche Methode entwickelte dafür Baumann [5]. Wird zudem teil-

weise oder vollständig elektrische Energie aus dem Stromnetz bezogen, sind aufgrund der langen Nutzungsphase der Gebäude, Zukunftsszenarien des länderspezifischen Strom-Mixes zu betrachten.

5.5 Wirkungsabschätzung und Auswertung

In der ersten Phase, der Gebäudesystemeebene, wird auf Basis der ausgewählten Datenbank ermittelt, wie die statistischen Umweltwirkungen pro Jahr, Nutzungsart, Fläche, Standort und Adaptionlevel aussehen. Je detaillierter die Datengrundlage ist, desto detaillierter lässt sich pro Wirkungskategorie auswerten. Die Aufbereitung der Datenbank ist beispielhaft in Tabelle 6 dargestellt, in der der Benchmark ein niedriges Adaptionlevel, ein Bürogebäude und der Standort in Stuttgart pro m²a umfasst. In den Zeilen können weitere Gebäude und in den Spalten weitere Umweltwirkungen aufgeführt werden. Eine Auswertung des Adaptionlevels ist nur möglich, wenn die Datenbank adaptive Gebäude beinhaltet. Auf Basis der aufbereiteten Datenbank werden anschließend statistische Abschätzungen zur Gebäudesystemeebene durchgeführt und mögliche, fallspezifische Potentiale der adaptiven Systeme und ihrer Adaptionlevel ermittelt [111].

Tabelle 6: Fiktive Wirkungsabschätzung und Auswertung in Phase 1 der Methodik ActUate

Gebäude	Adaptionlevel	Nutzungsart	Standort	Umweltwirkung [UW/m ² a]			...
				A1-A3	B6
1	Niedrig	Büro	Stuttgart	8,5	0,5
2	Niedrig	Büro	Stuttgart	7,2	0,8
...

In der zweiten bis vierten Phase ist die Wirkungsabschätzung nach DIN EN ISO 14040 [29] und DIN EN ISO 14044 [30] vorgesehen. Die Methodik ermöglicht, alle Wirkungskategorien zu untersuchen. Auf Basis der Wirkungsabschätzung und Auswertung werden signifikante Parameter identifiziert und herausgestellt. Darauf aufbauend findet iterativ eine Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfung statt, die mit in die Auswertung einfließt.

Für die Auswertung in ActUate ist vorgesehen, die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zu analysieren und aufzubereiten. Die Aufbereitung ist fallspezifisch variabel zu gestalten und muss in Anlehnung an DIN EN 15978 [26] und DIN EN ISO 14044 [30] folgende Kriterien erfüllen:

- Am Ende der Auswertung wird die Zielstellung erreicht.
- Untersuchungsrahmen, Annahmen und Ausgrenzungen müssen dokumentiert werden.
- Ergebnisse sind verständlich und visuell aufgearbeitet.
- Signifikante Parameter werden in der visuellen Darstellung thematisiert.
- Anspruchsvolle Inhalte müssen mit der Planerin ausführlich diskutiert werden.
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen werden formuliert.
- In der vierten Phase wird eine vollständige Berichterstattung nach DIN EN 15978 [26] durchgeführt werden.

Für die Erfüllung dieser Kriterien spielt die Darstellungsart der Umweltwirkungen eine wichtige Rolle. Die im Schritt drei definierten Dateninputs und Parameter des dynamischen Endenergiebedarfs müssen hier klar aufgezeigt werden. Eine Möglichkeit ist die Gegenüberstellung der Umweltwirkungen aus der Betriebsphase B6 und der Konstruktion (Herstellung, Austausch, Lebensende), wie in Abbildung 34 dargestellt. Die Umweltwirkung ist in der Abbildung auch als UW abgekürzt. Diese Gegenüberstellung hilft, bei Variantenvergleichen unter anderem einen Überblick zu bekommen, in welcher Lebenszyklusphase die größten Umweltwirkungen entstehen. Dadurch können signifikante Parameter entdeckt und weiter untersucht werden.

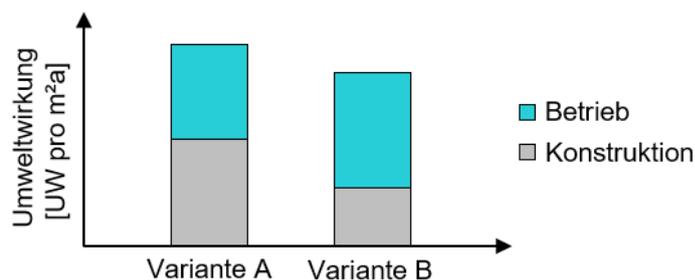


Abbildung 34: Ergebnisdarstellung der Umweltwirkungen adaptiver Gebäude aufgeteilt in Betrieb und Konstruktion

Eine weitere Auswertungs- und Darstellungsmöglichkeit ist die Break-Even Abschätzung. Diese bietet sich beispielsweise an, wenn die Konstruktion klar definiert ist, die Endenergiewerte in der Betriebsphase dynamisch und dadurch noch unsicher

sind. In Abbildung 35 ist dies exemplarisch dargestellt. Die Umweltwirkung wird in der Abbildung auch als UW abgekürzt.

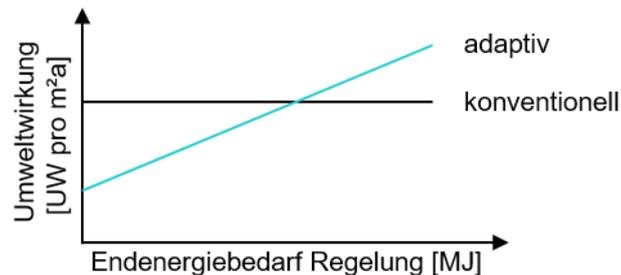


Abbildung 35: Break Even Darstellung bei adaptiven Gebäuden

Die horizontale Linie stellt den konstanten Wert eines konventionellen Tragwerks dar. Die blaue Linie zeigt das adaptive Tragwerk. Diese beginnt auf der Ordinate mit der Umweltwirkung der Konstruktion und steigt entsprechend der Zunahme an Endenergiebedarf für die Regelung an. Diese Darstellung hilft, dynamische Energieverbräuche und ihre Auswirkungen in der Nutzungsphase verständlich zu visualisieren. Auf Basis dieser Darstellung kann im nächsten Schritt (direkte Anwendung) diskutiert werden, ob es technisch gesehen realistisch ist, mit dem adaptiven System unter dem Schnittpunkt zu bleiben.

5.6 Direkte Anwendung

Im interdisziplinären Planungsprozess adaptiver Gebäude ist der Schritt der direkten Anwendung sehr bedeutsam. Die erarbeiteten Ergebnisse werden der Planerin und weiteren Vertreterinnen von Fachdisziplinen, unter Erfüllung der in Kapitel 5.5 vorgestellten Kriterien, präsentiert und Schlussfolgerungen sowie Empfehlungen diskutiert.

Indem Bottom-Up Benchmarks angewendet werden, gelingt es in der ersten Phase von ActUate Umweltwirkungen des adaptiven Gebäudes grob abzuschätzen. Die Variation signifikanter Parameter, wie dem Adaptionlevel, ermöglicht das Potential einer Anpassung zu diskutieren und technisch abzustimmen [111]. Außerdem erfolgt eine Einordnung in den aktuellen Gebäudebestand der Datenbank.

In der zweiten und dritten Phase werden die Ergebnisse auf Basis des Ziels und des Untersuchungsrahmens vorgestellt und diskutiert [111]. Die Planerin und die anderen Vertreterinnen der Fachdisziplinen schätzen die technische Machbarkeit der Schlussfolgerungen der Ökobilanzexpertin ein. Außerdem sind die Auswirkungen des dynamischen Endenergiebedarfs zu diskutieren. Besonders zu erörtern sind die in Abbildung 22 in Kapitel 4.5 schwarz umrandeten sieben Einflussfaktoren: Ausprägung der Kubatur, Materialmenge, Statik und konstruktive Durchbildung, Materialart, Auslegung adaptives System, Einsatz der TGA und die Energiequelle. Diese sind direkt lenkbar und haben meist direkten Einfluss auf die Höhe der Umweltwirkungen. Zuletzt ermöglicht der iterative Charakter, verschiedene Varianten erneut zu betrachten.

In der vierten Phase ergeben sich in der direkten Anwendung keine konkreten Handlungsschritte für den Planungsprozess. Lediglich für die restliche Betriebsphase und das Lebensende können hier noch Weiterentwicklungen erfolgen. Die ermittelten Ergebnisse werden genutzt, um die Datenbank der Benchmarkauswertung zu füllen. Darüber hinaus kann auf Basis der Berichterstattung eine Zertifizierung der Gebäude vorgenommen werden. Auf der Grundlage der Endergebnisse wird die Methodik ActUate evaluiert, in dem unter anderem die Ökobilanzergebnisse in den einzelnen Planungsphasen gegenübergestellt werden, um etwaige Abweichungen zu untersuchen. [111]

5.7 Zusammenfassung und Fazit der Methodik

Adaptive Gebäude sollen im Vergleich zu konventionellen Gebäuden Ressourcen einsparen. ActUate gliedert sich in den neuartigen, interdisziplinären und komplexen Planungsprozess adaptiver Gebäude ein und ermöglicht die lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen im Planungsprozess abzuschätzen. ActUate unterstützt, die Umweltwirkungen ganzheitlich zu reduzieren. Als Grundlage dienen die Handlungsempfehlungen aus der umfangreichen Systemuntersuchung in Kapitel 4.

Abbildung 36 zeigt zusammengefasst den gesamten Ablauf und die Systemgrenzen der Methodik ActUate. Auf der linken Seite ist der Dateninput der Planerin in ActUate und auf der rechten Seite die Ergebnisse aus ActUate an die Planerin zu sehen.

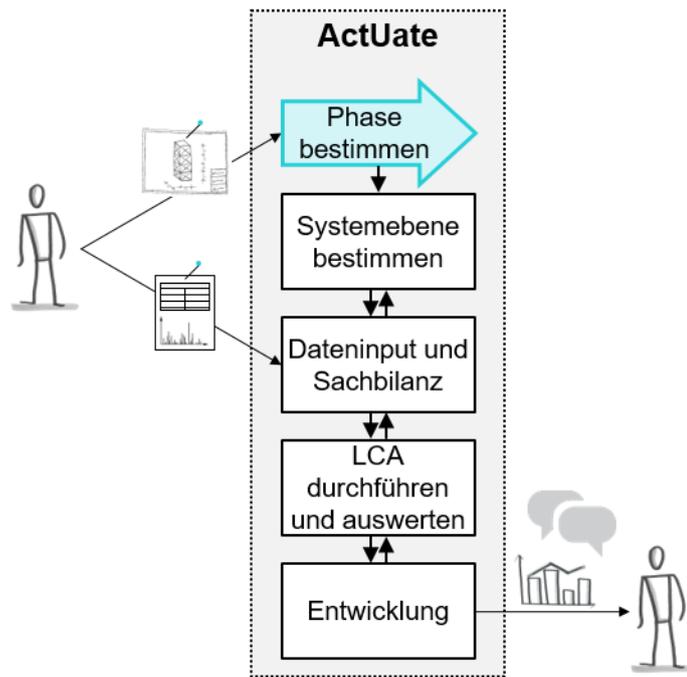


Abbildung 36: Zusammenfassender Überblick über die Methodik ActUate

ActUate besteht insgesamt aus fünf Schritten. Im ersten Schritt ist eine zeitliche Einordnung in den Planungsprozess vorgesehen. Dafür sind vier mögliche Planungsphasen definiert, die sich eignen, Umweltwirkungen abzuschätzen. Die Planerin übermittelt in diesem Schritt die Grundidee an die Ökobilanzexpertin, um die Phaseneinordnung vorzunehmen. In der ersten Phase werden auf Basis von Benchmarks die Umweltwirkungen grob abgeschätzt. Die zweite und dritte Phase finden während der Entwurfs- und Konzeptphasen statt. Während die zweite Phase eine grobe Abschätzung mit viel Entscheidungsmöglichkeiten erlaubt, werden in der dritten Phase genauere Umweltwirkungen berechnet, die jedoch keine großen Veränderungen des Bauobjekts ermöglichen. Die vierte Phase ist bereits in der Betriebsphase von Gebäuden angesiedelt bei der dann bilanziert wie gebaut wird. Der Detaillierungsgrad der Entwürfe und Konzepte steigt über die vier Phasen immer weiter an. ActUate soll in allen vier Phasen angewendet werden, um Umweltwirkungen zu reduzieren. Jedoch bauen die Abschätzungen der einzelnen Phasen nicht zwingend aufeinander auf. Nach der zeitlichen Einordnung werden im zweiten Schritt die vordefinierte (Sub-)Systemebene bestimmt sowie das Ziel definiert, um die Ergebnisse vergleichen und übertragen zu können. Hier wird zudem eine passende Datenbank für die Berechnung adaptiver Gebäude ausgewählt. Im dritten Schritt werden die Daten erfasst, um eine Sachbilanz aufzustellen. Diese übermittelt die Planerin in strukturierter Weise und untersucht tiefgehend den dynamischen Endenergieverbrauch durch zwei Flussdiagramme. Auf Basis der Sachbilanz erfolgt im vierten Schritt die Wirkungsabschätzung, welche im Anschluss ausgewertet wird.

Diese Auswertung ist so zu gestalten, dass sie der Planerin im letzten Schritt verständlich vorgestellt werden kann und die Ergebnisse der dynamischen Nutzungsphase klar kommuniziert werden können. Die Ergebnisse dienen dazu, Entwicklungspotentiale aufzuzeigen und gemeinsam weitere Handlungsschritte zu formulieren. ActUate ist so aufgebaut, dass innerhalb einer Abschätzung, aber auch zwischen den einzelnen Planungsphasen, iterativ vorgegangen werden kann.

Das Zwischenfazit des Kapitels 4.6. enthält verschiedene Erkenntnisse aus der Systemuntersuchung und abgeleitete Handlungsempfehlungen für ActUate. Tabelle 7 zeigt zusammenfassend deren konkrete Umsetzungen in ActUate. Durch den Buchstaben der ersten Spalte wird Bezug zu den Erkenntnissen und Handlungsempfehlungen des Kapitels 4.6 genommen.

Tabelle 7: Umsetzung der Handlungsempfehlungen A bis H in ActUate

Umsetzung in ActUate	
A	- Die thermische Behaglichkeit wird in der funktionellen Einheit adaptiver Gebäudehüllen berücksichtigt.
B	- Baurechtliche Rahmenbedingungen, Nutzungsart und Standort werden ab der ersten Phase in ActUate mitberücksichtigt.
C	<ul style="list-style-type: none"> - Materialart, Materialmenge und Endenergie (Betrieb und Regelung) sind als direkter Dateninput in ActUate integriert. - Adaptive Systeme, Energiequelle und TGA werden indirekt über die Materialart, -menge und dem Hilfsmedium abgefragt. - Rezyklierfähigkeit und Instandhaltung werden indirekt über die Bearbeitungsart untersucht. Ab der dritten Phase wird zudem die Lebenszyklusphase B4 (Austausch) standardmäßig betrachtet. - Die Lebensdauer wird als Nutzungsdauer ab der ersten Phase in ActUate als Dateninput mitbedacht.
D	- In der ersten Phase von ActUate werden durch Benchmarks die Umweltwirkungen abgeschätzt.
E	- Die neuen Einflussfaktoren adaptiver Gebäude werden über die Materialart und den Endenergiebedarf erfasst.
F	- Das Flussdiagramm in Abbildung 32 bietet eine Vorgehensweise im Umgang mit den dynamischen Energieverbräuchen.
G	- Das Flussdiagramm in Abbildung 33 ermöglicht eine Abfolge im Umgang mit den Umweltprofilen der Energiebereitstellung.
H	- Es ergibt sich ein koordinierter Dateninput durch die Planerin. Dieser setzt sich aus der strukturierten Übermittlung der materiellen Komponenten sowie des dynamischen Endenergiebedarfs zusammen.

6 Anwendung der Methodik

Kapitel sechs dient der beispielhaften Anwendung und damit dem Nachweis der Praktikabilität von ActUate. Es werden zwei verschiedene Beispiele berechnet. Das Erste stellt ein adaptives Tragwerk dar und das Zweite eine adaptive Fassade. Beide stammen aus dem Projekt SFB 1244 und befinden sich mit dem aktuellen Projekt-Forschungsstand in der zweiten Phase von ActUate.

6.1 Beispiel 1: Adaptives Tragwerk

In diesem Beispiel wird ein adaptives Tragwerk mit der Methodik ActUate abgeschätzt. Es handelt sich um das Tragwerk eines Hörsaals an der Universität Stuttgart, welches sich in der zweiten Phase von ActUate befindet. Das Beispiel stammt aus dem SFB 1244 und ist in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt C02 entstanden. Mitarbeiterinnen des Teilprojekts C02 von dem Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren sowie dem Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design haben die technischen Rahmenbedingungen und Berechnungen ausgearbeitet. In diesem Fallbeispiel tauschen sich die Fachexpertinnen und die Ökobilanzexpertin direkt aus.

6.1.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Ein durchschnittlicher Hörsaal ist zu etwa 10 % der Zeit durch Studierende besetzt. Die restliche Zeit ist dieser zumeist leer, obwohl er dafür ausgelegt ist, konstant voll besetzt zu sein. Die Anwendung von ActUate zielt auf die Gegenüberstellung und Abschätzung eines adaptiven und eines konventionellen Hörsaaltragwerks. Dabei wird ein Tragwerk auf Funktionssystemebene betrachtet. Die Aktuierung erfolgt durch Fluidaktoren. Hinsichtlich der Umweltwirkungen schafft der Variantenvergleich eine Entscheidungsgrundlage für die weitere technische Entwicklung der Fluidaktoren in Tragwerken.

Bei dem Tragwerk wird die Bodenplatte des Hörsaals betrachtet. Diese ermöglicht, wie in Abbildung 37 zu sehen, eine Masseersparnis von 37,5 %. Die restlichen konstruktiven Bestandteile, wie zum Beispiel die Bestuhlung, sind in beiden Varianten gleich und liegen daher außerhalb des Untersuchungsrahmens.

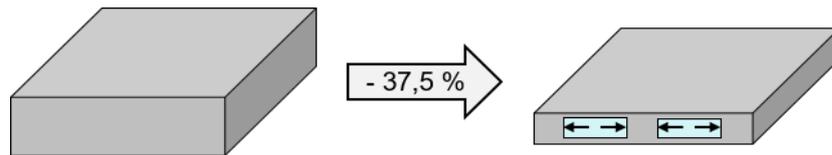


Abbildung 37: Funktionsprinzip der Fluidaktoren am Beispiel eines Hörsaals

Die Systemgrenze der Berechnung ist die Herstellung (A1 bis A3), die Betriebsphase (B6) des adaptiven Systems und das Lebensende (C3, C4, D). Angaben zum Austausch (B4) sind technisch noch nicht ausgearbeitet. Für die Berechnung wird mit der Software und Datenbank GaBi [126] mit dem Servicepaket 39 gearbeitet. Als funktionelle Einheit wird die Nutzung einer Fläche von 100 m² über 25 Jahre als Hörsaal festgelegt.

Für die Wirkungsabschätzung werden die Wirkungskategorie Klimaänderung in Form von Treibhauspotential 100 Jahre (CML 2001, Version Januar 2016) sowie die Ressourcengröße Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen untersucht.

6.1.2 Dateninput und Sachbilanz

Die Fachexpertinnen stellen für die Berechnung nachfolgende Daten bereit.

- **Nutzungsdauer:** 25 Jahre
- **Nutzungsart:** Hörsaal
- **Fläche:** 100 m² Bruttogrundfläche
- **Standort:** Stuttgart-Vaihingen

Darüber hinaus sind in Tabelle 8 die Daten für die verschiedenen Komponenten und die dazugehörigen nötigen Informationen dargestellt. Die Spalten beinhalten die zwei Varianten des konventionellen und adaptiven Hörsaals.

Tabelle 8: Dateninput für den adaptiven und konventionellen Hörsaal

	Konventionell	Adaptiv	
Komponenten	Platte	Platte	Fluidaktor
Materialart	Beton	Beton	Stahl
Materialmenge	73,6 t	46 t	33,4 kg (=0,7 kg x 50 Aktoren)
Art und Menge Hilfsmedium	-		9,6 l Hydrauliköl
Regelendenergie	-		318 kWh/a

Die Materialart der Platte ist Beton und die Fluidaktoren werden aus Stahl hergestellt. Das Gewicht der Fluidaktoren ergibt sich aus deren Maße von 80x80x30 mm, der Blechdicke von 0,5 mm und der Dichte des Stahls (7860 kg/m³). Insgesamt werden 50 Aktoren für eine Fläche von 100 m² benötigt. Aus dem Volumen der 50 Fluidaktoren ergeben sich zudem die Menge von 9,6 l Hydrauliköl. Die Regelendenergie setzt sich zusammen aus der Dauer der Aktuierung und der Leistung des Hydraulikaggregats von 1,5 kW. Die Fluidaktoren arbeiten mit einem Zwischenspeicher, so dass das Aggregat lediglich jedes fünfte Mal den gewünschten Druck erzeugen muss. Die Dauer der Aktuierung ist die Kombination aus der vorlesungsfreien Zeit (19 Wochen pro a) und der Vorlesungszeit (29 Wochen pro a). Während der Vorlesungszeit wird angenommen, dass fünf Tage die Woche für sechs Stunden (4 Mal 1,5 h) Lehrveranstaltungen stattfinden. Annahme in der vorlesungsfreien Zeit ist, dass an fünf Tagen die Woche eine Klausur von zwei Stunden geschrieben wird. Es ergibt sich eine Regelendenergie von 318 kWh/a.

Aus der Betrachtung ausgeschlossen sind alle weiteren Bestandteile des adaptiven Systems, da diese zum Planungszeitpunkt noch nicht ausgelegt und berechnet wurden. Diese setzen sich voraussichtlich aus dem Hydraulikaggregat, dem Kabel und den Schläuchen zusammen.

Bei der Untersuchung des Dateninputs hinsichtlich der Flussdiagramme aus Kapitel 5.4 fällt auf, dass der Energiebedarf mehr als 5% der Umweltwirkungen einnimmt. Aus dem ersten Flussdiagramm ergibt sich, dass es sich um eine Abschätzung in

der zweiten Phase handelt. Somit ist der Endenergiebedarf der Regelung mit Methoden der Unsicherheiten zu untersuchen. Der dynamische Endenergiebedarf hängt von verschiedenen Parametern ab, welche folgend in Abbildung 38 beschrieben werden. Aus dem zweiten Flussdiagramm ist zu folgern, dass für die Abschätzung der zukünftige deutsche Strom-Mix zu betrachten ist. Die Berechnung umfasst daher drei verschiedene Parameter mit acht verschiedenen Szenarien für die Betriebsphase (B6), welche in Abbildung 38 dargestellt sind.

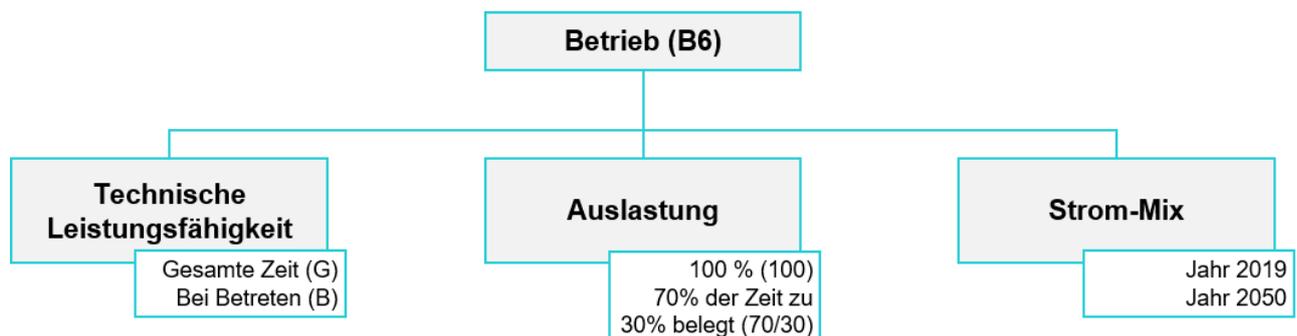


Abbildung 38: Parameter für die Abschätzung der Umweltwirkungen des adaptiven Hörsaals

Die ersten zwei Parameter ergeben sich aufgrund der noch unklaren technischen Leistungsfähigkeit. Für diesen Planungsstand ist noch nicht berechnet, ob das Hydraulikaggregat die gesamte Zeit betrieben werden muss oder ob es ausreichend ist, das Hydraulikaggregat nur zu aktivieren, wenn die Studierenden den Hörsaal betreten. Angenommen wird, dass das Betreten 15 Minuten andauert. Des Weiteren sind zwei Parameter für die Auslastung der Hörsäle durch die Studierende definiert. Der erste Parameter steht für eine vollständige Auslastung des Hörsaals zu 100 % der Zeit. Der zweite Parameter entspricht einer zeitlichen Auslastung von 30 % in 70 % der Zeit. Neben dem deutschen Strom-Mix von 2019 wird zudem mit dem Zukunftsszenario in Hinblick auf das Jahr 2050 für die Betriebsphase der Regelung gerechnet. Dafür wird die Zusammensetzung des deutschen Strom-Mixes nach dem EU Referenzszenario [16] unterstellt, welches länderspezifische Entwicklungspfade aufzeigt. Laut GaBi-Datenbank [126] weist die derzeitige Produktion im Jahr 2019 einer kWh in Deutschland 0,6 kg CO₂-äq. auf. Die Zusammensetzung des Strom-Mixes des EU Referenzszenario ergibt bis zum Jahr 2050 für Deutschland eine Reduktion auf 0,2 kg CO₂-äq. je kWh. Der Parameter des zukünftigen Strom-Mixes wird nur im Betrieb eingesetzt und nicht in der Herstellung oder dem Lebensende. Nachfolgend werden die Parameter und die sich daraus ergebenden Szenarien mit den

in der Abbildung 38 dargestellten Abkürzungen beschrieben. Zum Beispiel steht „G100 2019“ für die Regelung in der gesamten Zeit bei einer 100 % Auslastung und dem Strom-Mix von 2019.

Zusätzlich zu dem in Tabelle 8 dargestellten Dateninput ergeben sich dadurch bei einer gesamten Regelung (G) 1060 h/a und bei einer Regelung bei Betreten (B) 168,75 h/a. 1060 h/a resultieren aus der Multiplikation von 29 Wochen mit fünf Tagen und sechs Stunden sowie der Multiplikation von 19 Wochen mit fünf Tagen und zwei Stunden. Für die Regelung bei Betreten wird statt Stunden pro Tag mit vier Vorlesungen á 15 min in der Vorlesungszeit und einer Prüfung á 15 min in der vorlesungsfreien Zeit gerechnet. Der Szenarienbetrachtung werden folgende Endenergiewerte für die Regelung zugrunde gelegt:

- G100: 318 kWh/a
- B100: 50,6 kWh/a
- G70/30: 159 kWh/a
- B70/30: 25,3 kWh/a

6.1.3 Wirkungsabschätzung und Auswertung

Für die Wirkungsabschätzung wurden mit den in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Annahmen Modellierungen und Berechnungen durchgeführt.

Die Ergebnisse für das GWP sind in Abbildung 39 dargestellt. Auf der Ordinate ist das GWP mit der Einheit kg CO₂-äq. pro m²a aufgetragen. Die horizontale schwarze Linie zeigt das GWP für das konventionelle Tragwerk. Dieses ergibt sich aus der Herstellung und dem Lebensende des benötigten Betons. In grau ist die Konstruktion des adaptiven Tragwerks zu sehen. Die Konstruktion besteht aus der Herstellung und dem Lebensende des Betons, den Fluidaktoren und dem Hydrauliköl. Dabei entsteht 97 % des GWP in der Konstruktion durch den Beton. In blau dargestellt ist das GWP durch die Regelung im Betrieb. Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für das Jahr 2019 und auf der rechten Seite die Ergebnisse für 2050. In 2050 reduziert sich die Menge des GWP aufgrund der zu erwartenden CO₂-äq. Reduktion des Strom-Mixes. Die Anzahl der Regelungen verändert sich nicht. Das Szenario G100 mit dem Strom-Mix aus 2019 hat mit insgesamt 5,04 kg CO₂-äq. pro m²a den höchsten Wert. Das konventionelle Tragwerk liegt mit 5,01 kg CO₂-äq. pro m²a bei einem etwas geringeren Wert. Die restlichen Ergebnisse liegen unterhalb des konventionellen Tragwerks.

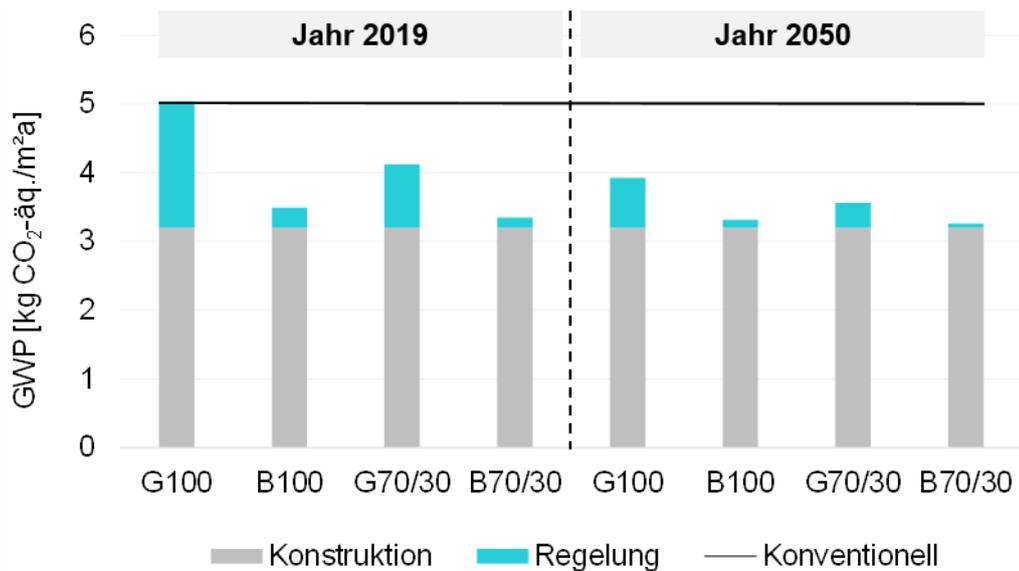


Abbildung 39: Ergebnisse des Treibhauspotentials (GWP) für den adaptiven und konventionellen Hörsaal

In Abbildung 40 sind die Ergebnisse für PE_{ne} abgebildet. Die Darstellungweise ist die Gleiche wie in Abbildung 39.

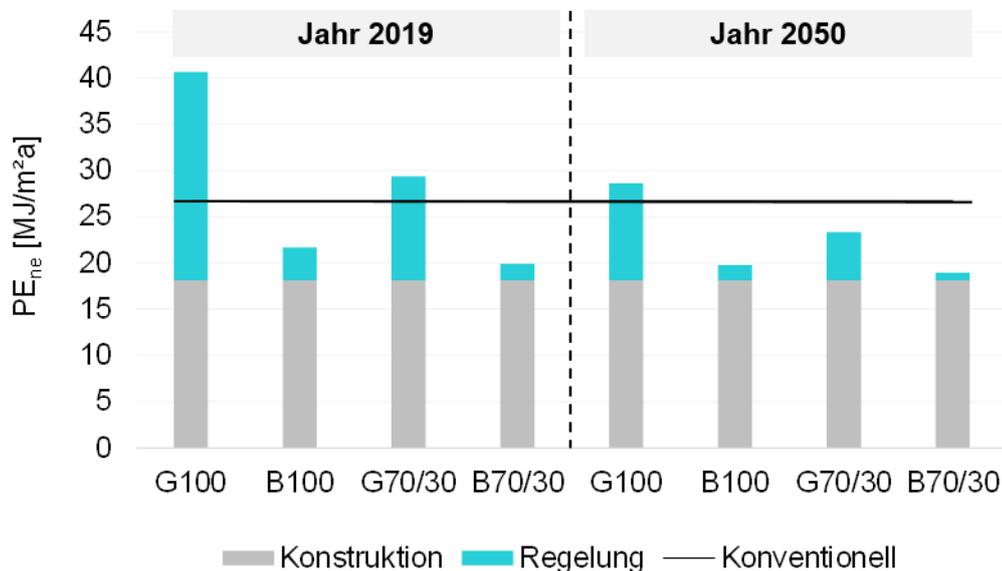


Abbildung 40: Ergebnisse des Primärenergiebedarfs aus nicht-erneuerbaren Ressourcen (PE_{ne}) für den adaptiven und konventionellen Hörsaal

Auch hier ist das Szenario G100 mit 40,66 MJ pro m²a das mit dem höchsten Wert jedoch deutlich über dem konventionellen Referenzwert. Zudem liegt G70/30 2019 und G100 2050 über dem Wert des konventionellen Tragwerks (26,69 MJ pro m²a).

Ferner stammen etwa 90 % der Konstruktion des adaptiven Tragwerks aus der Herstellung und aus dem Lebensende des Betons.

6.1.4 Direkte Anwendung

Die Betrachtung verschiedener Szenarien im Fall der adaptiven Struktur ermöglicht unterschiedliche Erkenntnisse hinsichtlich der Umweltwirkungen. Große untersuchte Einsparungen können erreicht werden, wenn es technisch möglich ist, die Aktuierung nur während des Betretens der Studierenden zu aktivieren. Wenn sich herausstellt, dass eine Aktuierung über den gesamten Zeitraum nötig ist, sollte statistisch genau erörtert werden, wie groß die Auslastung durch die Studierenden pro Vorlesung tatsächlich ist. Auf Basis des Zukunftsszenarios sind voraussichtlich ab 2050 nur noch die Werte von PE_{ne} bei dem Szenario G100 höher. Eine weitere Möglichkeit, Umweltwirkungen einzusparen, könnte sein, wenn der Verbrauch des Aggregats verbessert wird oder ausschließlich erneuerbarer Energien genutzt werden.

Bei einer weiteren Abschätzung in der dritten Phase von ActUate könnte zudem überprüft werden, was für eine Auslegung das Hydraulikaggregat hat und wieviel Kabel und Schläuche welcher Qualität einzubauen sind. Ferner wäre für weitere Abschätzungen technisch zu bestimmen, wie die Fluidaktoren instandgehalten und recycelt werden.

6.2 Beispiel 2: Adaptive Fassade

Im zweiten Beispiel wird eine adaptive Fassade auf Raumebene mit der Methodik ActUate abgeschätzt. Es handelt sich um eine Membrankonstruktion für das Demonstrator Hochhaus am Standort Stuttgart, die sich in der zweiten Phase befindet. Das Beispiel wurde im SFB 1244 in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt C05 durchgeführt. Die technischen Rahmenbedingungen und Berechnungen arbeitete die Mitarbeiterin des Teilprojekts C05 vom Institut für Akustik und Bauphysik aus. Siehe dazu auch [61]. In diesem Fallbeispiel besteht direkter Austausch zwischen der Fachexpertin und der Ökobilanzexpertin.

6.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

In diesem Beispiel wird ein Variantenvergleich einer Membrankonstruktion und einer adaptiven Membrankonstruktion durchgeführt, wobei die Membrankonstruktion als

konventionelle Fassade und die adaptive Membrankonstruktion als adaptive Fassade bezeichnet wird. Beim Variantenvergleich soll herausgefunden werden, wie hoch die Umweltwirkungen der verschiedenen Varianten prospektiv sind. Es sollen mögliche Anknüpfungspunkte herausgefunden und formuliert werden, um die Membrankonstruktionen weiterzuentwickeln. Beim Produktsystem handelt es sich um die Funktionssystemebene und dabei um eine Fassade auf Raumebene. Die adaptive Fassade ordnet sich in die Funktion einer wärmeadaptiven Fassade ein.

Abbildung 41 zeigt auf der linken Seite die konventionelle und auf der rechten Seite die adaptive Fassade für den (wärme)dämmenden sowie (wärme)leitenden Zustand. Der graue Bereich bildet die Dämmung ab und die vertikalen schwarzen Linien stellen die Membranen dar. Bei der adaptiven Fassade ist zwischen den schwarzen Linien in weiß das Hilfsmedium Luft dargestellt. Bei ihr werden die Membrankissen für den dämmenden Zustand mit Luft gefüllt. Leere Membrankissen stellen den leitenden Zustand dar. Der dämmende Zustand wird unter 20°C und über 26°C eingestellt und für die restlichen Temperaturen wird der leitende Zustand vorgesehen.

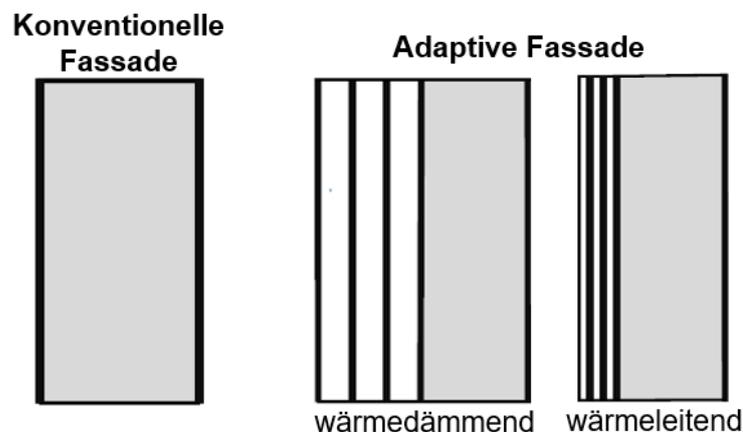


Abbildung 41: Funktionsprinzip der konventionellen und adaptiven Fassade in Anlehnung an [61]

Die Fassade umhüllt von allen vier Außenseiten einen Büroraum mit einer Grundfläche von 31 m² und einer Höhe von 3 m. Die räumlichen Bestandteile (zwei Geschosdecken, drei Fenster, Wärmepumpe, Multisplit Klimaanlage) werden in beiden Beispielen als identisch angenommen und aus der Ökobilanzbetrachtung ausgeschlossen. Lediglich der Endenergiebedarf in der Betriebsphase für das Heizen und Kühlen geht in die Berechnung ein. Die Lüftung wird als manuelle Lüftung angenommen.

Die Systemgrenze der Berechnung ist die Herstellung (A1 bis A3), die Betriebsphase (B6) des adaptiven Systems und das Lebensende (C3, C4, D). Für den Austausch stehen zu diesem Planungszeitpunkt noch keine Daten zur Verfügung. Für die Berechnung wird mit der Online-Software Generis [43] und der Datenbank ÖKOBAU-DAT 2016 [12] gearbeitet.

Als funktionelle Einheit wird die Nutzung der Bruttogrundfläche von 31 m² für 50 Jahre festgelegt. Der Raum wird so konditioniert, dass ein PMV von 0 bis -1 erreicht wird. Die herkömmliche Fassade weist einen U-Wert von 0,24 W/m²K auf. Die adaptive Fassade hat im dämmenden Zustand einen U-Wert von 0,24 W/m²K und im leitenden Zustand einen U-Wert von 0,29 W/m²K.

Für die Wirkungsabschätzung werden die Wirkungskategorie Klimaänderung in Form von Treibhauspotential 100 Jahre (CML 2001, Version Januar 2016) sowie die Ressourcengröße Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen untersucht.

6.2.2 Dateninput und Sachbilanz

Für die Abschätzung der Umweltwirkungen wurden nachfolgende allgemeine Daten und die in Tabelle 9 variantenbezogenen Daten durch die Fachexpertin bereitgestellt.

- **Nutzungsdauer:** 50 Jahre
- **Nutzungsart:** Büroraum
- **Fläche:** 31 m² Nettogrundfläche
- **Standort:** Stuttgart-Vaihingen; südwestliche Orientierung

Tabelle 9: Dateninput für die adaptive und konventionelle Fassade

		Konventionell	Adaptiv
Komponenten		Fassadenkonstruktion	Fassadenkonstruktion
Materialarten		Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE) Zellulosedämmung	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE) Zellulosedämmung
Materialmenge pro Raum		ETFE: 42,27 kg Zellulosedämmung: 466,2 kg	ETFE: 105,67 kg Zellulosedämmung: 372,96 kg
Art und Menge Hilfsmedium		-	Luft
Regelendenergie		-	14,8 kWh/a
Heizenergie	Dämmend	2280,4 kWh/a	2213,5 kWh/a
	Leitend		2581,8 kWh/a
Kühlenergie	Dämmend	1597,2 kWh/a	1436,4 kWh/a
	Leitend		1655,6 kWh/a

Die Werte für die Heiz- und Kühlenergie wurden aus WUFI Pro [42] durch das Teilprojekt C05 für die Ökobilanzberechnung bereitgestellt. Für die Regelenergie wurden eigene Berechnungen durchgeführt. Dafür dienten die Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes, die die Datenbank Meteonorm [96] bereitstellt. Die Temperaturdaten – aufgenommen an der Messstation Flughafen Stuttgart – bilden die Durchschnittswerte für die Jahre 2000 bis 2009 ab. Diese Messstation ist vom Standort Stuttgart Vaihingen aus die nächstgelegene. Aus den Temperaturdaten werden die Aktuierungshäufigkeit sowie die zeitlichen Anteile für den dämmenden und leitenden Zustand auf Basis der beschriebenen Temperaturschwellenwerte ermittelt. Insgesamt wechselt 324 Mal pro Jahr der dämmende und der leitende Zustand. Der dämmende Zeitraum stellt sich insgesamt 88 % der Zeit und der leitende Zustand in 12 % ein. Die Membrankissen werden bei einem konstanten Überdruck zwischen 180 Pa und 250 Pa gehalten. Dafür sind für eine Fläche von 1000 m² eine Leistung von durchschnittlich 60 W nötig und 0,27 kWh pro m²a. [78] Für die vier Raumwände abzüglich eingebauter Fenster wird eine Membranfläche von 62,2 m² benötigt und

daher 16,8 kWh pro a. Da die Leistung nur für den dämmenden Zustand benötigt wird, wird insgesamt 14,8 kWh pro a aufgewendet.

Aus der Betrachtung ausgeschlossen sind die Anlage zur Erzeugung der Druckluft sowie die Kabel und Schläuche. Hierzu liegen dieser Phase noch keine Berechnungen und Angaben vor.

Bei der Untersuchung des Dateninputs hinsichtlich der Flussdiagramme fällt auf, dass sich der Anteil des gesamten Endenergiebedarfs über 5 % der Umweltwirkungen befindet und somit beide Flussdiagramme durchlaufen werden.

Für das erste Flussdiagramm ist festzustellen, dass die zeitliche Einordnung in der 2. Phase angesiedelt ist und daher Unsicherheitsuntersuchungen durchgeführt werden müssen. Die Parameter des Endenergiebedarfs teilen sich auf in die für die Regelung und die für den Heiz- und Kühlbetrieb. Die Werte für die Regelung hängen einerseits von den Leistungsannahmen der EPD [78] ab und zum anderen von dem berechneten Anteil des dämmenden Zustands. Der Endenergiebedarf für das Heizen, das Kühlen und der Regelung steht in Abhängigkeit von denselben Klimadaten und beeinflussen sich daher nur indirekt. Da der Endenergiebedarf der Regelung unter 1 % ist, die Leistungsannahmen der EPD qualitativ hochwertig sind und die Endenergiewerte sich durch die gewählte Datengrundlage nicht beeinflussen, werden keine weiten Untersuchungen der Endenergie für die Regelung durchgeführt. Die Datengrundlage des Energiebedarfs für Heizen und Kühlen beruht auf den zwei Zuständen für den dämmenden und leitenden Zustand. Der Energiebedarf für die zwei Zustände wurde mit der für herkömmliche Gebäude erprobten Software WUFI berechnet. Diese Datenherkunft ist bei der direkten Anwendung zu kommunizieren. Die Endenergiewerte für die dämmenden und leitenden Zustände basieren bereits auf Klimadurchschnittsdaten. Diese Werte müssen daher nicht erneut auf Unsicherheiten untersucht werden. Eine zusätzliche Abschätzung der Unsicherheiten würde darüber hinaus auf die Energiebedarfe des Betriebs beider Fassaden gleichermaßen zutreffen, so dass sich die Anteile eventuell verschieben würden, aber der Variantenvergleich keine unterschiedlichen Erkenntnisse erbringen würde.

Der zweite Entscheidungsbaum zeigt, dass eine Untersuchung der Zukunftsszenarien für den Anteil der elektrischen Energie vorzunehmen ist. Dafür wird mit der Zusammensetzung des deutschen Strom-Mixes nach dem EU Referenzszenario [16] gerechnet, welches länderspezifische Entwicklungspfade aufzeigt. Laut der GaBi-Datenbank [126] hat die Produktion einer kWh im Jahr 2019 in Deutschland

0,6 kg CO₂-äq. Die Zusammensetzung des Strom-Mixes des EU Referenzszenario ergibt bis zum Jahr 2050 für Deutschland eine Reduktion auf 0,2 kg CO₂-äq. Der Parameter des zukünftigen Strom-Mixes wird nur im Betrieb eingesetzt und nicht in der Herstellung oder beim Lebensende.

6.2.3 Wirkungsabschätzung und Auswertung

Für die Wirkungsabschätzung wurde mit der in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Daten-grundlage eine Modellierung und Berechnung des Variantenvergleichs in Generis durchgeführt.

In Abbildung 42 und Abbildung 43 sind die Ergebnisse für GWP und PE_{ne} für die zwei Fassaden pro m²a in den Jahren 2019 und 2050 abgebildet. In grau sind die Umweltwirkungen für die Herstellung und das Lebensende der konventionellen und der adaptiven Fassaden erkennbar. In dunkel- und hellblau sind GWP sowie PE_{ne} durch den Endenergiebedarf für das Heizen und Kühlen abgebildet. Die Regelungsenergie von GWP und PE_{ne} ist in schwarz dargestellt. Auf der linken Seite ist das Jahr 2019 sichtbar, welches den aktuellen Zeitpunkt darstellt, und auf der rechten Seite das Jahr 2050. Im Jahr 2019 weist sowohl das GWP als auch der PE_{ne} der adaptiven Fassade etwas geringere Werte als die konventionelle Fassade auf. Die Anteile für das Heizen und Kühlen sind sehr viel größer als die der Fassade und der Adaptivität. Dieser Trend zeigt sich auch im Jahr 2050, da in beiden Fassaden der Anteil des Endenergiebedarfs gleichermaßen sinkt. Sein geringerer Regelungsanteil verringert sich dabei noch weiter.

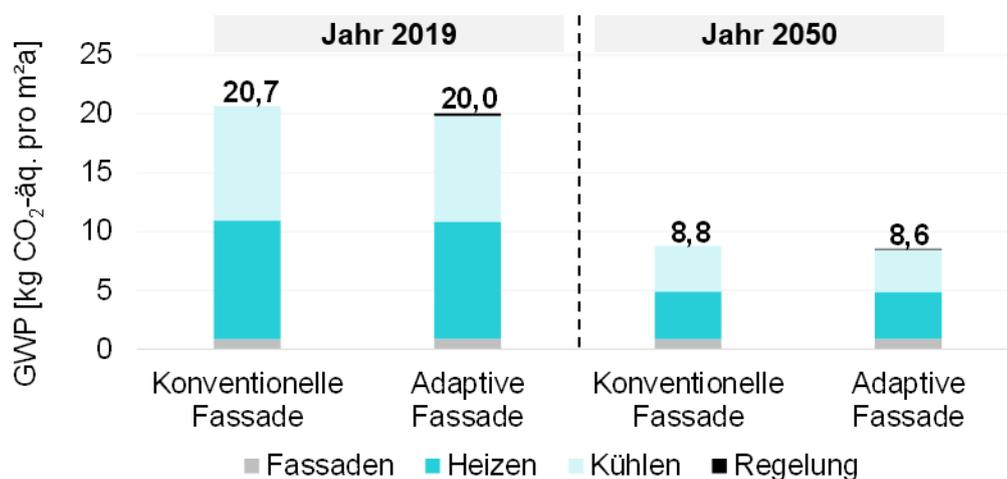


Abbildung 42: Ergebnisse des Treibhauspotentials (GWP) für die adaptive und konventionelle Fassade in Anlehnung an [61]

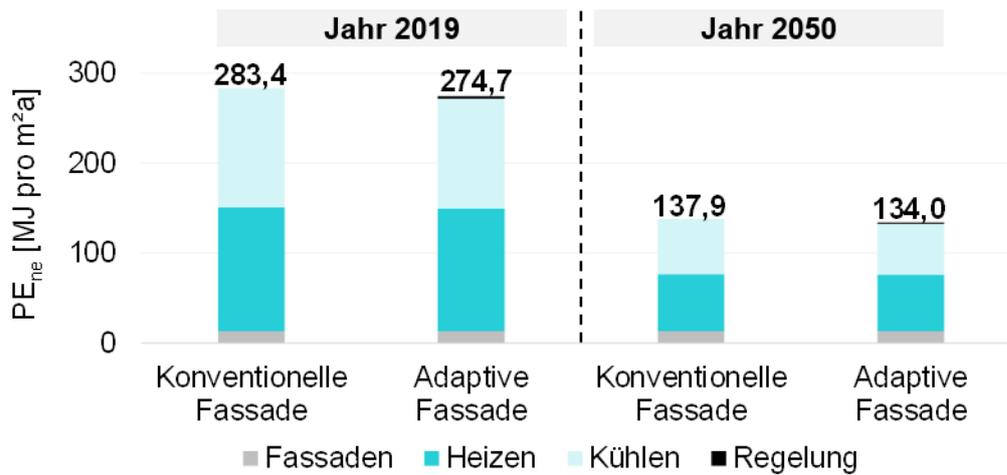


Abbildung 43: Ergebnisse des Primärenergiebedarfs aus nicht-erneuerbaren Ressourcen (PE_{ne}) für die adaptive und konventionelle Fassade in Anlehnung an [61]

6.2.4 Direkte Anwendung

Die Ergebnisse zeigen, dass auf Raumebene die adaptive Fassade minimal besser abschneidet als die konventionelle Fassade. Beide Varianten zeigen zudem hohe Werte im Bereich des Heizens und Kühlens. Diese bieten das größte Potential, um Umweltwirkungen einzusparen. Welche technischen Möglichkeiten es dazu gibt, ist von der Planerin sowie weiteren Expertinnen aus verschiedenen Fachdisziplinen zu überprüfen.

Die Anzahl an Aktuierungen der Fassade wird derzeit so angenommen, dass bei jedem Übertreten der Temperaturgrenzen (20°C und 26°C) eine Aktuierung erfolgt. Durch eine intelligente Schaltung könnte bei der Regelung zusätzlich Endenergiebedarf eingespart werden, indem beispielsweise kurzzeitige Über-/Unterschreitungen nicht aktuiert werden.

Für die Planung zudem interessant, ist wie sich die Umweltwirkungen der Fassaden an anderen Standorten verschieben würden. Wie in Kapitel 5 beschrieben, ist die Berechnung mit ActUate immer fallspezifisch anzusehen und kann daher an anderen Standorten auf andere Bedingungen treffen. In Tabelle 10 sind im Vergleich zu Deutschland die Werte der zwei Varianten der Fassade in zwei weiteren Klimaregionen zu sehen.

Tabelle 10: Dateninput für die adaptive und konventionelle Fassade in Deutschland, Finnland und Saudi-Arabien

		Deutschland (Stuttgart)	Finnland (Oulu)	Saudi-Arabien (Riad)
Dämmender Zustand		88 %	97 %	83 %
Leitender Zustand		12 %	3 %	17 %
Regelendenergie [kWh/a]		14,8	16,2	13,9
Heizendenergie [kWh/a]	Konventionell	2280,4	4119,3	298
	Dämmend	2213,5	4151,5	296,5
	Leitend	2581,8	4587,3	357,7
Kühlendenergie [kWh/a]	Konventionell	1597,2	940,3	5866,3
	Dämmend	1436,4	805,8	5918,1
	Leitend	1655,6	955,1	6213,4

In Abbildung 44 sind die Ergebnisse der drei verschiedenen Klimaregionen für die adaptive und konventionelle Fassade dargestellt.

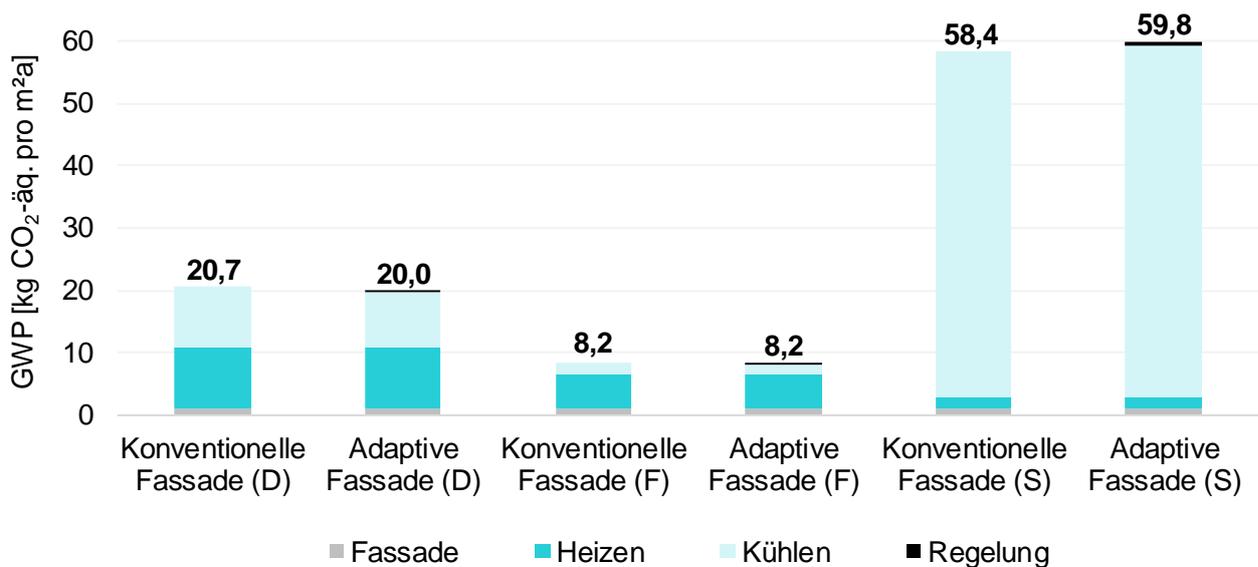


Abbildung 44: Ergebnisse des Treibhauspotentials (GWP) der adaptiven Fassade in Deutschland, Finnland und Saudi-Arabien

Ganz links ist die Ausgangsvariante für Deutschland (D) zu sehen. In der Mitte befindet sich die Berechnung für Finnland (F) und rechts für Saudi-Arabien (S). Die Berechnungen wurden identisch zur Herangehensweise in Kapitel 6.2.2 und 6.2.3 erstellt. Zu beachten ist, dass jeweils der spezifische Strom-Mix der drei Länder für die Berechnung verwendet wurde. Nach der GaBi Datenbank liegt in 2019 der Deutsche Strom-Mix bei 0,568 kg CO₂-äq. pro kWh, der finnische Strom-Mix bei 0,175 kg CO₂-äq. pro kWh und der Strom-Mix aus Saudi-Arabien bei 0,884 kg CO₂-äq. pro kWh.

Die Fassaden in Saudi-Arabien weisen das höchste GWP auf, während der Einsatz der Fassade in Finnland den geringsten GWP ergibt. Die großen Unterschiede zwischen den drei Ländern ergeben sich vor allem durch den unterschiedlichen Strom-Mix. In Deutschland und Finnland weist die adaptive Fassade etwas geringere Werte auf und in Saudi-Arabien die konventionelle Fassade.

Diese Ergebnisse und Erkenntnisse sind für die Planung in Bezug auf den weiteren Einsatz der Fassade interessant. Der Projektstandort ändert sich in der zweiten Phase in der Regel nicht mehr und dies wäre auch aus Sicht der Systemuntersuchung aus Kapitel 4 nicht ratsam.

7 Evaluation

In Kapitel 6 ist die Methodik bereits durch zwei beispielhafte Anwendungen demonstriert. In Kapitel 7 folgt nun ihre Evaluation. Dazu werden zuerst die in Kapitel 3 aufgestellten Anforderungen hinsichtlich ihrer Umsetzung diskutiert. Darauf aufbauend werden abschließend die Möglichkeiten und Grenzen der Methodik ActUate dargestellt.

7.1 Überprüfung der Anforderungen

Im Nachfolgenden werden zuerst die methodischen und anschließend die technischen Anforderungen aus Kapitel 3.1 hinsichtlich ihrer Umsetzung in ActUate diskutiert.

7.1.1 Methodische Anforderungen

Anhand der methodischen Anforderungen wird einzeln evaluiert, inwiefern ActUate allgemein gültig und übertragbar ist.

Anknüpfung an die Methode der Ökobilanz: ActUate orientiert sich durchgehend am Ablauf und den Rahmenbedingungen der Ökobilanz. Bevor mit dem ersten Schritt der Ökobilanz, dem Ziel und Untersuchungsrahmen, begonnen wird, ist die zeitliche Einordnung in den Planungsprozess vorgehsehen.

Fallspezifische Anwendung: Die Methodik ermöglicht, die Umweltwirkungen individuell und fallspezifisch abzuschätzen. Dafür wird bei jeder Anwendung ein individueller Untersuchungsrahmen gebildet, um dadurch eine Datensammlung und Abschätzung zielgerichtet vornehmen zu können.

Transparenz und Reproduzierbarkeit der Teil- und Endergebnisse: In jedem Schritt von ActUate wird genau dargelegt, wie vorgegangen wird und welche Daten und Annahmen verwendet werden. Dadurch wird die Methodik nachvollziehbar und die Ergebnisse werden übertragbar.

Methodische Integration in den Planungsprozess adaptiver Gebäude: ActUate wurde durch vier definierte Phasen zeitlich in den Planungsprozess adaptiver Gebäude integriert, was in [111] gemeinsam mit den Entwicklerinnen des Planungspro-

zesses ausgearbeitet und abgestimmt wurde. Expertinnen aus dem Bereich der Architektur und Tragwerksplanung bestätigten die Funktionalität der methodischen Integration in den Planungsprozess hinsichtlich der nötigen Datengrundlage und der Rahmenbedingungen [111]. Wenn der Planungsprozess adaptiver Tragwerke zukünftig noch für adaptive Gebäudehüllen verfeinert werden soll, muss die Integration der Ökobilanz nochmals überprüft werden.

Modularer Aufbau und Fortschreibbarkeit: Neben einigen festgelegten Rahmenbedingungen ist die Methodik modular aufgebaut. Die einzelnen Bestandteile der Methodik können unter Beachtung der Wechselwirkungen ergänzt und weiterentwickelt werden. Ebenso können potentielle Änderungen des Planungsprozesses adaptiver Gebäude in ActUate integriert werden.

Anwendbarkeit mit konventionellen Gebäuden: ActUate bietet die Möglichkeit, belastbare Ökobilanzergebnisse für konventionelle Gebäude und Komponenten zu erzeugen. Dies zeigen unter anderem die Beispiele in Kapitel 6. Zu beachten ist jedoch, dass die Systemuntersuchung und daher die Wechselwirkungen für adaptive Gebäude ausgelegt sind. Eine ausführliche Systemuntersuchung konventioneller Gebäude könnte zusätzliche Perspektiven für die Abschätzung konventioneller Gebäude und Komponenten erschließen.

Individueller Softwareeinsatz: Wie in den beiden Beispielen in Kapitel 6 zu sehen ist, können die Umweltaspekte durch verschiedene Softwarelösungen modelliert und berechnet werden. Ebenso ist es denkbar, Teilergebnisse in verschiedenen Softwaresystemen zu erarbeiten und diese in der Auswertung zusammenzubringen. Hier ist jedoch auf eine konsistente Datenbasis zu achten.

7.1.2 Praktische Anforderungen

Im Nachfolgenden werden die praktischen Anforderungen einzeln evaluiert, um die Funktionsfähigkeit der Methodik aufzuzeigen.

Vertretbarer Zeitaufwand: Der größte zeitliche Aufwand in der Ökobilanz besteht in der Regel darin, die Daten zu beschaffen und aufzuarbeiten. Die genaue Auflistung der notwendigen Dateninputs pro Phase vereinfacht diesen Schritt.

Konsistenz und Kompatibilität der Datengrundlage: Die Anknüpfung an die Methode der Ökobilanz ermöglicht in der zweiten bis vierten Phase mit diversen bestehenden Datenbanken zu arbeiten, welche im Bereich des nachhaltigen Bauens zum

Beispiel die ÖKOBAUDAT [12] ist. Für die Abschätzung der Umweltwirkungen adaptiver Systeme eignen sich derzeit vorwiegend allgemeine Ökobilanzdatenbanken wie die GaBi Datenbank [126]. Die Materialmengen ergeben sich aus dem Planungsprozess der adaptiven Gebäude. Lediglich neuartige Materialien und Anlagentechnik für adaptive Systeme, die nicht in EPDs bilanziert wurden, müssen hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen neu modelliert werden. Für die erste Phase existiert derzeit noch keine Datengrundlage, jedoch wurden in [112] die Rahmenbedingungen dafür geschaffen.

Datenverfügbarkeit: Die zeitliche Integration von ActUate in den Planungsprozess adaptiver Gebäude ist so gewählt, dass in den einzelnen Phasen die notwendigen Daten aus den verschiedenen Fachdisziplinen vorhanden sind. Dies wurde in den Beispielen in Kapitel 6 bewiesen und durch Expertinnen aus dem Bereich der Architektur und Tragwerksplanung bestätigt [111].

Iterative und flexible Anwendung: Die vier Phasen von ActUate sind iterativ anwendbar und müssen nicht aufeinander aufbauen. Beispielsweise kann nach der Abschätzung der Umweltwirkungen in der dritten Phase wieder eine Abschätzung in der zweiten Phase erfolgen. Darüber hinaus ist auch eine iterative Vorgehensweise innerhalb einer Phase möglich, wie zum Beispiel die erneute Veränderung von Parametern nach einer Sensitivitätsanalyse.

Möglichkeit eines Variantenvergleichs: Die beiden Beispiele in Kapitel 6 zeigen, dass ein Variantenvergleich in ActUate möglich ist. Es ist darauf zu achten, bei der Festsetzung des Untersuchungsrahmens vergleichbare Konstruktionen zu definieren.

Entscheidungsunterstützung im Planungsprozess adaptiver Gebäude: Indem zu Beginn Ziele formuliert werden, können die Umweltwirkungen auf diese hin vollständig abgeschätzt und ausgelegt werden. Die Beschreibung und Vorstellung der Ergebnisse im letzten Schritt ergibt einen direkten Austausch zwischen der Planerin und der Ökobilanzexpertin, wodurch die Planerin Unterstützung während der Planung erfährt.

7.2 Möglichkeiten und Grenzen

Adaptive Gebäude sollen in Zukunft enorme Einsparungen von Ressourcen und Umweltwirkungen ermöglichen. Die Methodik ActUate unterstützt deren komplexen Planungsprozess, indem die lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen von Beginn an berücksichtigt werden. Der Methodik ActUate liegt eine umfassende Systemuntersuchung zugrunde. Dadurch wird ein weitfassender Blick auf den Planungsprozess adaptiver Gebäude ermöglicht und es werden vorhandene Wechselwirkungen mit beachtet. ActUate baut auf vorhandene Normen und anerkannte Ansätze auf, um Kompatibilität zu diesen zu gewährleisten.

Die Entwicklung von ActUate innerhalb des SFB 1244 ermöglicht einen regelmäßigen Austausch und kritische Diskussionen über die Inhalte und den Ablauf der Methodik. Dadurch ist ActUate in Bezug auf die adaptiven Gebäude gesichert. Expertinnen aus der Praxis des Bauwesens bestätigten zudem die Umsetzbarkeit und methodische Integration in den Planungsprozess [111].

ActUate liegen eine Systemuntersuchung, die Vorgehensweisen des Planungsprozesses adaptiver Gebäude sowie bereits bestehende Ansätze zugrunde. Einige Anpassungen ermöglichen die Methodik ebenso bei konventionellen Gebäuden anzuwenden. Gerade die umfassende Untersuchung des gesamten Systems zeichnet ActUate in der Tiefe, wie auch in die Breite aus. Aus diesen ergeben sich für ActUate Erkenntnisse, die ebenso für konventionelle Gebäude notwendig sind, beispielweise eine frühe Festlegung von Einflussfaktoren, wie der Nutzungsdauer oder die Integration der thermischen Behaglichkeit in die funktionelle Einheit. Die methodische Struktur, zu der unter anderem die zeitliche Einordnung und die Abfolge der Schritte gehören, ist so aufgebaut, dass sie modular anpassbar ist und sich an der Vorgehensweise der Ökobilanz orientiert. Auch hier ist die Anwendung für konventionelle Gebäude denkbar mit dem Zusatz, adaptive Systeme mit ihren dynamischen Energieverbräuchen ebenso umfassend abbilden zu können. Darüber hinaus erweitern sich gleichfalls bei konventionellen Gebäuden zunehmend elektronische Bestandteile. Die Ansätze in ActUate ermöglichen zudem, dies zukünftig systematisch mit zu berücksichtigen und zu integrieren.

Durch die definierten Rahmenbedingungen und Vorgehensweisen in ActUate wird das komplexe System adaptiver Gebäude und ihrer Umweltaspekte greifbarer. Dennoch ist die Ökobilanzierung aufwändig und komplex. Dies hat zum einen zur Folge, dass für die Anwendung von ActUate eine Ökobilanzexpertin nötig ist. Zum anderen

bleibt es weiterhin zeitintensiv, die Umweltwirkungen abzuschätzen, was vor allem auf die Erfassung der Sachbilanz zurückzuführen ist. Daher sind für die Datenerhebung und -berechnung die Bereitschaft und Unterstützung der Planerin erforderlich.

In der ersten Phase von ActUate wurden für die Datenbank die Rahmenbedingungen und Vorarbeiten geschaffen, jedoch existiert diese bislang noch nicht. Daher können aktuell keine Abschätzungen während der ersten Phase durchgeführt werden.

Darüber hinaus ist der Endenergiebedarf für die Regelung derzeit noch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, da keine spezifischen Messwerte vorliegen. Es fehlen hierzu die Simulationsprogramme und die Expertinneneinschätzungen, weshalb die Aussagekraft im Hinblick auf die Regelung aktuell nicht immer gegeben ist.

8 Zusammenfassung

Im Bauwesen entstehen durch das signifikante Ressourcenaufkommen weltweit etwa 40% des Treibhauspotentials (GWP) im Bauwesen [79]. In Zeiten des anthropogenen Klimawandels und der Zerstörung des Lebensraums vieler Menschen werden neue Konzepte im Bauwesen benötigt.

Konventionelle Gebäude sind dafür ausgelegt, allen Einwirkungen des Umfelds, wie Winde oder auch Extremereignissen wie Erdbeben, durch statische Masse entgegenzuwirken. Eine Möglichkeit, Ressourcen einzusparen, stellen adaptive Gebäude dar. Diese werden derzeit an der Universität Stuttgart im Sonderforschungsbereich (SFB) 1244 mit dem Titel „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ erforscht. Durch die Integration von Aktor-Sensor-Systemen können Gebäude bei auftretenden Einwirkungen gezielt verändert werden. Dadurch können Funktionen ausgeübt werden, die bislang z.B. durch eine Überdimensionierung von Bauteilen erreicht wurde. Die Integration adaptiver Systeme in Tragwerke ermöglicht, Masse zu verringern, Spannungsspitzen zu reduzieren, Schwingungen zu dämpfen und die Lebensdauer zu erhöhen. Adaptive Gebäudehüllen zielen neben der Massenreduktion darauf ab, elektrische Energie einzusparen. Dies gelingt beispielsweise durch die adaptive Nutzung äußerer Einwirkungen, wie Winde im Sommer zur Kühlung oder Sonne im Winter zum Wärmen.

Der Planungsprozess adaptiver Gebäude nimmt im Vergleich zu dem von konventionellen Gebäuden an Komplexität zu. Zu integrieren sind neue Planungsaspekte, wie die dynamische Bauteilauslegung von Tragwerkselementen, die Aktorplatzierung oder auch Sicherheits- und Wartungskonzepte. Dazu benötigt der Planungsprozess zukünftig neue Fachdisziplinen wie den Maschinenbau, woraus sich ein neuartiges, komplexes und interdisziplinäres Zusammenwirken ergibt. Um ganzheitlich den Ressourcenbedarf und die Umweltwirkungen zu reduzieren, müssen diese ebenfalls im Planungsprozess beachtet werden. Eine reine Verschiebung der Umweltwirkungen von der Herstellungsphase in die Betriebsphase wäre etwa nicht zielführend. Eine große Herausforderung dabei, ist die niedrige Datenverfügbarkeit in den frühen Planungsphasen.

In dieser Arbeit wurde daher eine Methodik mit dem Ziel entwickelt, Abschätzungen von lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen im Planungsprozess adaptiver Gebäude zu ermöglichen und damit aufzuzeigen, wie Umweltwirkungen zu reduzieren

sind. Die Umweltwirkungen werden durch die standardisierte Methode der Ökobilanz ermittelt.

Bisherige Ansätze integrieren die Ökobilanz in den Planungsprozess konventioneller Gebäude wie zum Beispiel Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy Efficient Buildings Initiative oder Level(s). In diesen lassen sich adaptive Gebäude nicht ohne Weiteres abbilden, da diese anders als konventionelle Gebäude geplant werden und weitere Dateninputs nötig sind. Darüber hinaus entwickelte Battisti et al. ein Werkzeug, mit dem adaptive Gebäudetechnologien in deren Planungsprozess möglichst umweltverträglich ausgelegt werden sollen. In Battisti et al. haben adaptive Gebäudetechnologien jedoch das Ziel, durch adaptive Materialien vor allem die Umweltwirkungen der Endenergie im Betrieb zu senken und nicht über Aktor-Sensor-Systeme die Masse des Gebäudes. Ferner werden bislang nur Komponenten und Parameter der adaptiven Fassade betrachtet und keine vollständigen Gebäude.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Abschätzung von lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen im Planungsprozess adaptiver Gebäude (ActUate) dient dazu Gebäudeentwürfen und -konzepten hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen abzuschätzen, um fallspezifisch geeignete adaptive Systeme konzipieren zu können. Dadurch werden Planende unterstützt, die Umweltwirkungen zu reduzieren.

Für die Methodikentwicklung wurde eine umfassende Systemuntersuchung adaptiver Gebäude im Kontext ihrer Umweltaspekte durchgeführt. Durch diese lassen sich effektive Maßnahmen formulieren, um die Umweltwirkungen abzuschätzen und die Reduktion zu unterstützen. Um dies zu erreichen, wurden zuerst die Einflussfaktoren gesammelt, die das System abbilden. Ergebnis ist ein Einflussfaktorenkatalog von 19 Einflussfaktoren. Diese lassen sich in fünf Cluster aufteilen: Ressourcen (z.B. Materialart), Skalierungsfaktoren (z.B. Lebensdauer), externe Faktoren (z.B. Standort), Effekte auf die Umwelt (z.B. Höhe der Umweltwirkungen) und Gebäudefunktionsanforderungen (z.B. Instandhaltungsfreundlichkeit). Auf Basis der Einflussfaktoren folgte anschließend eine Wechselwirkungsanalyse, in der untersucht wurde, wie die einzelnen Einflussfaktoren, die jeweils anderen beeinflussen und wie diese selbst beeinflusst werden. Die Wechselwirkungsanalyse ergibt unter anderem die Notwendigkeit, den Fokus auf die Einflussfaktoren zu lenken, die direkt die Höhe der Umweltwirkung beeinflussen. Diese haben für die Abschätzung, aber auch für die Reduktion der Umweltwirkungen, den größten Einfluss. Zudem lassen sich den

einzelnen Einflussfaktoren einzelne Rollen zuordnen. Zum Beispiel ergibt die Untersuchung der Wechselwirkungen der Lebensdauer, dass diese möglichst früh im Planungsprozess festgelegt werden sollte, wodurch undurchsichtige, komplexe Wechselwirkungen vermieden werden können. Abschließend zeigt die Systemuntersuchung die deutlich gesteigerte Datenkomplexität im Vergleich zu konventionellen Gebäuden. Diese ergibt sich zum einen durch die Zunahme der Stakeholderinnen am Planungsprozess und den damit zusammenhängenden unterschiedlichen Datengrundlagen. Zum anderen steigt die Komplexität durch die Unsicherheiten der eintretenden Einwirkungen auf das Gebäude und der damit zusammenhängenden variablen Energiebedarfe in der Nutzungsphase. Für die Betriebsphase ist ein dynamischer Energiebedarf zu erwarten, der in ActUate mitberücksichtigt werden muss.

Auf Basis der Handlungsempfehlungen aus der Systemuntersuchung wurde der Ablauf und die Vorgehensweise von ActUate hergeleitet. Der iterative Ablauf von ActUate gliedert sich in fünf Schritte und baut dabei auf den Rahmenbedingungen der Ökobilanz auf:

1. Zeitliche Einordnung
2. Ziel und Untersuchungsrahmen
3. Sachbilanz
4. Wirkungsabschätzung und Auswertung
5. Direkte Anwendung

Im ersten Schritt von ActUate ist die zeitliche Einordnung in den Planungsprozess adaptiver Gebäude vorgesehen. Dafür sind vier verschiedene Planungsphasen definiert, die sich dafür eignen, Umweltwirkungen abzuschätzen. Die erste Planungsphase ordnet sich direkt zu Beginn ein, wenn die Grundlagen für die Planung ermittelt werden. Die zweite und dritte Planungsphase ist während des Entwurfs sowie der Ausarbeitungsphase vorgesehen. Die vierte Phase beginnt, wenn das Gebäude bereits gebaut ist und Daten über den Betrieb bekannt sind. Im zweiten Schritt von ActUate werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen formuliert. Die Wahl der Systemebene ermöglicht, den Detailgrad der Abschätzung zu ermitteln und die Ergebnisse vergleichbar und übertragbar zu machen. Der dritte Schritt umfasst die Datenerfassung und -berechnung mit dem Ziel, die Sachbilanz aufzustellen. Für jede Planungsphase ist definiert, welcher Dateninput benötigt wird, um die Umweltwirkungen abzuschätzen und eine aussagekräftige Ökobilanz durchzuführen. Inhalt

des vierten Schrittes ist die Wirkungsabschätzung und Auswertung. Die Auswertung ist entsprechend des zu Beginn gestellten Ziels vorzunehmen. Im letzten Schritt, der direkten Anwendung, werden die Ergebnisse mit den entsprechenden Expertinnen der Fachdisziplinen diskutiert und gemeinsam wird erörtert, an welchen Stellen Entwicklungspotential vorhanden ist.

Die Anwendbarkeit der Methodik ActUate wurde an einem adaptiven Tragwerk und einer adaptiven Fassade demonstriert. Das adaptive Tragwerk ist Bestandteil eines universitären Hörsaals. Dieses erfährt lediglich 10 % der Zeit die Belastung, für die es 100 % der Zeit ausgelegt ist. Durch adaptive Systeme könnte hier eine Masseersparnis von bis zu 38 % erreicht werden und je nach Auslastung in der Betriebsphase könnten auch bis zu 33 % CO₂ Äquivalente eingespart werden. Im zweiten Beispiel wurde einer adaptiven Fassade eine konventionelle Fassade in Form einer Membrankonstruktion gegenübergestellt. Die adaptive Fassade schneidet im Vergleich zur konventionellen Fassade hinsichtlich des GWPs minimal besser ab. Beide Fassaden besitzen im Bereich des Heizens und Kühlens großes Einsparpotential. Die Beispielrechnungen zeigen auf, dass sich die Methodik anwenden lässt.

ActUate ermöglicht, Umweltwirkungen bei komplexen adaptiven Gebäuden und deren Komponenten abzuschätzen. Diese Methodik ist dabei als Ergänzung und Erweiterung vorhandener Ansätze zu sehen und ist zu diesen kompatibel. ActUate legt einen Grundstein, um die Ressourcen und Umweltwirkungen im Bauwesen ganzheitlich zu reduzieren und dem Klimawandel entgegen zu treten.

9 Ausblick

Die fortführenden Forschungsideen von ActUate werden im Nachfolgenden anhand von kurzfristigen und langfristigen Perspektiven formuliert. Begonnen wird mit Möglichkeiten der kurzfristigen Weiterentwicklung.

Die zwei Einflussfaktoren Rezyklierfähigkeit und Instandhaltung lassen sich derzeit vor allem durch den Dateninput der Bearbeitungsart und der Beachtung der Lebenszyklusphasen B4, C3 und C4 in ActUate integrieren. Um die methodische Integration der Rezyklierfähigkeit und Instandhaltung zu verbessern und damit Umweltwirkungen zu reduzieren, sollten noch ergänzende Werkzeuge oder Methoden ausgearbeitet und in ActUate platziert werden.

Neben dem derzeit mit Fokus auf Phase 2 durchgeführten Beispielberechnungen sollte die Anwendungsbasis verbreitet und es sollten alle Phasen abgedeckt werden. Die Berechnungen weiterer Fallbeispiele ermöglichen zudem Verfeinerungen an der Methodik.

Detailliertere Ökobilanzen von adaptiven Komponenten und Gebäuden weisen in der Regel mehr Umweltwirkungen auf als vereinfachte Ökobilanzen. Dies ergibt sich zum Beispiel daraus, dass bei detaillierten Ökobilanzen die Verarbeitungen der Konstruktionen mitbeachtet werden. Um steigende Umweltwirkungen zu vermeiden, kann dies zur Folge haben, dass diese nur zu Beginn der Planung abgeschätzt werden. Entsprechende Sicherheitsaufschläge pro Phase könnten diese Thematik zum Bestandteil von ActUate machen.

Eine langfristige Weiterentwicklung von ActUate kann die (Teil-)Automatisierte Kommunikation zwischen verschiedenen Planungstools sein. Im Planungsprozess adaptiver Gebäude lässt sich mit verschiedenen Simulationsprogrammen wie WUFI arbeiten. Um den Planungsaufwand zu reduzieren, sollte zwischen diesen eine Datenkommunikation erfolgen, wodurch beispielsweise bei der Simulation der bauphysikalischen Eigenschaften gleichzeitig die Berechnungen für die Ökobilanz durchgeführt werden könnten.

Der Planungsprozess adaptiver Gebäude ist derzeit erst für adaptive Tragwerke vollständig ausgereift (Kapitel 2.1.2). Dieser wird im SFB 1244 aktuell für adaptive Gebäudehüllen ausgeweitet. Für den erweiterten Planungsprozess der sowohl adaptive Strukturen als auch Gebäudehüllen beinhaltet müssen die Schnittstellen zu ActUate erneut evaluiert und verfeinert werden. Desweiteren wird in ActUate angenommen,

dass der Austausch zum Planungsprozess über eine Hauptplanerin erfolgt. Würde sich bei dem erweiterten Planungsprozess herausstellen, dass diese Funktion nicht vorhanden ist, müssten innerhalb des Planungsprozesses adaptiver Gebäude detaillierte Schnittstellen zu den einzelnen Fachdisziplinen gezogen werden, um so einen direkten Austausch zwischen den Fachdisziplinen zu ermöglichen.

Wenn adaptive Gebäude standardisiert geplant und gebaut werden, kann ActUate mit Ansätzen verknüpft werden, die die Umweltwirkungen im Planungsprozess konventioneller Gebäude berechnen. Dadurch könnte die Ökobilanzexpertin in Zusammenarbeit mit der Planerin auf Basis dieser zusammengefassten Methodik entscheiden, welches Adaptionlevel ein Gebäude haben sollte, um die Umweltwirkungen zu minimieren.

Schließlich ist es denkbar, die Methodik ActUate auf den Planungsprozess von „smarten“ Gebäuden auszuweiten. Diese können unter anderem die Optimierung des Endenergiebedarfs steuern und benötigen dafür mehr technologische Komponenten in Gebäuden. Smarte Gebäude werden in Zukunft stark zunehmen und sind dahingehend zu konzipieren, dass statt noch mehr zu erzeugen, Umweltwirkungen eingespart werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] Albert, A., Burkardt, N.: Systemleichtbau ganzheitliche Gewichtsreduzierung. In: Henning, F. (Hg.); Moeller, E. (Hg.): Handbuch Leichtbau, Hanser, München (2011).
- [2] Anders, S.: Stadt als System; Methode zur ganzheitlichen Analyse von Planungskonzepten. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart (2016).
- [3] Architektenkammer Baden-Württemberg (AKBW): Bauteam – ein Leitfaden für Architekten und Handwerker, <https://www.akbw.de/download/bauteam-leitfaden.pdf> (Stand: 23.11.2020).
- [4] Battisti, A., Persiani, S. G. L., et al.: Review and Mapping of Parameters for the Early Stage Design of Adaptive Building Technologies through Life Cycle Assessment Tools. *Energies* 12 (2019), 9, S. 1729.
- [5] Baumann, M.: Methode zur Ermittlung von Umweltprofilen fluktuierender Stromerzeugung. Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2019).
- [6] Bergmann, C.: Prozessneugestaltung im Bauen, eine Strategie. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart (2013).
- [7] Bhandar, G. S., Hauschild, M., et al.: Implementing Life Cycle Assessment in Product Development. *Environmental Progress* 22 (2003), 4, S. 255–267.
- [8] Birgisdottir, H., Rasmussen, F. N.: Development of LCAbyg: A National Life Cycle Assessment Tool for Buildings in Denmark. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Central Europe towards Sustainable Building, 290 (2019).
- [9] Blengini, G. A., Di Carlo, T.: Energy-saving policies and low-energy residential buildings; An LCA case study to support decision makers in Piedmont (Italy). *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15 (2010), 7, S. 652–665.
- [10] Braune, A., Ruiz Durán, C., et al.: Leitfaden zum Einsatz der Ökobilanzierung. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) (2018).

- [11] BREEAM: BREEAM rating benchmarks, https://www.breeam.com/BREEAMUK2014SchemeDocument/content/03_scoringrating_newcon/rating_benchmarks.htm (Stand: 23.11.2020).
- [12] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI): ÖKOBAUDAT; Informationsportal Nachhaltiges Bauen, <https://www.oekobaudat.de/> (Stand: 23.11.2020).
- [13] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI): Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/> (Stand: 23.11.2020).
- [14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Informationsportal eBNB, www.ebnb.bundesbau.de (Stand: 23.11.2020).
- [15] Cabeza, L. F., Rincón, L., et al.: Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector; A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014), S. 394–416.
- [16] Capros P, Vita, A. de, et al.: EU Reference Scenario 2016, Energy, transport and GHG emissions, Trends to 2050. European Commission, Luxemburg (2016).
- [17] Carlowitz, H. C. v.: *Sylvicultura oeconomica; haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht*. Reprint der 2. Aufl. Leipzig, Braun 1732. Kessel, Remagen-Oberwinter (2009).
- [18] Chastas, P., Theodosiou, T., et al.: Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO₂ emissions of residential buildings. *Building and Environment* 130 (2018), S. 212–226.
- [19] Clavreul, J., Guyonnet, D., et al.: Stochastic and epistemic uncertainty propagation in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (2013), 7, S. 1393–1403.
- [20] Crespi, M., Persiani, S. G. L., et al.: Mapping of LCA parameters as a tool for the design of sustainable cycle-based adaptive building skins. *Conference Proceedings of the 12th Conference of Advanced Building Skins* (2017), S. 142–152.

- [21] Crespi, M., Persiani, S. G. L.: Rethinking Adaptive Building Skins from a Life Cycle Assessment perspective. *Journal of Facade Design & Engineering* 7 (2019), 2, S. 21–43.
- [22] DGNB System: DGNB International, <https://www.dgnb-system.de/de/system/international/index.php> (Stand: 23.11.2020).
- [23] DGNB System: DGNB System; Kriterienkatalog Gebäude Neubau, <https://www.dgnb-system.de/de/system/version2018/> (Stand: 23.11.2020).
- [24] DIN 277-1:2005: Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen – Teil 1: Hochbau. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2016).
- [25] DIN EN 15804:2020: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2014).
- [26] DIN EN 15978:2011: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2012).
- [27] DIN EN 1990:2002: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010).
- [28] DIN EN ISO 14001:2004: Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2009).
- [29] DIN EN ISO 14040:2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2009).
- [30] DIN EN ISO 14044:2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Beuth Verlag GmbH (2018).
- [31] DIN EN ISO 7730:2005: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2006).
- [32] Dittes, F.-M.: Komplexität; Warum die Bahn nie pünktlich ist. Springer Vieweg, Berlin (2012).

- [33] Dodd, N., Cordella, M., et al.: Level(s) - Ein gemeinsamer EU-Rahmen zentraler Nachhaltigkeitsindikatoren für Büro- und Wohngebäude; Teil 1 und 2: Level(s) – Einführung und Funktionsweise. European Commission (2017).
- [34] Dodd, N., Cordella, M., et al.: Level(s) – Ein gemeinsamer EU-Rahmen zentraler Nachhaltigkeitsindikatoren für Büro- und Wohngebäude; Teil 3: Durchführung von Leistungsbewertungen mithilfe von Level(s). European Commission (2017).
- [35] Earth Overshoot Day: Global Footprint Network., <https://www.overshootday.org/newsroom/press-release-july-2019-german/> (Stand: 23.11.2020).
- [36] Ebertshäuser, S., Graf, K., et al.: Sustainable building information modeling in the context of model-based integral planning. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 323:012113 (2019).
- [37] Emami, N., Heinonen, J., et al.: A Life Cycle Assessment of Two Residential Buildings Using Two Different LCA Database-Software Combinations: Recognizing Uniformities and Inconsistencies. Buildings 9 (2019), 1, S. 20.
- [38] Energieeinsparverordnung (EnEV): Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung. Bundesgesetzblatt, Bonn (2014).
- [39] EnergieSchweiz: 2000-Watt Gesellschaft, <https://www.local-energy.swiss/programme/2000-watt-gesellschaft#/> (Stand: 23.11.2020).
- [40] Finnveden, G., Hauschild, M. Z., et al.: Recent developments in Life Cycle Assessment. Journal of environmental management 91 (2009), 1, S. 1–21.
- [41] Fisch, R., Beck, D.: Komplexitätsmanagement; Methoden zum Umgang mit komplexen Aufgabenstellungen in Wirtschaft, Regierung und Verwaltung. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2004).
- [42] Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: Software WuFi Pro (2020).
- [43] Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: Online-Software Generis, <https://www.generis.live> (Stand: 23.11.2020).
- [44] Fridays for Future AG: Unsere Forderungen an die Politik, <https://fridaysforfuture.de/forderungen/> (Stand: 23.11.2020).

- [45] Fürst, D.: Rahmenbedingungen des Einsatzes von Planungsverfahren im öffentlichen Sektor. In: Fisch, R. (Hg.); Beck, R. (Hg.): Komplexitätsmanagement, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2004).
- [46] Future Cities Lab: Lightswarm, <http://www.future-cities-lab.net/lightswarm/> (Stand: 23.11.2020).
- [47] Gantner, J., Wittstock, B., et al.: EeBGuide Guidance Document; Part A: Products. Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2015).
- [48] Gantner, J., Wittstock, B., et al.: EeBGuide Guidance Document; Part B: Buildings. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (2015).
- [49] Gantner, J.: Wahrscheinlichkeitsbasierte Ökobilanzierung zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in zukünftigen Entscheidungen und Ereignissen. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart (2017).
- [50] Gantner, J., Lenz, K., et al.: Ökobau.dat 3.0–Quo Vadis? Buildings 8 (2018), 9, S. 129.
- [51] Gantner, J., Both, P. v., et al.: Ökobilanz - Integration in den Entwurfsprozess. Bauphysik 40 (2018), 5, S. 286–297.
- [52] Geiger, F., Gade, J., et al.: Optimal Design of Adaptive Structures versus Optimal Adaption of Structural Design. 21st International Federation of Automatic Control World Congress (2020).
- [53] Gomez, P., Probst, G. J. B.: Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens; Vernetzt denken, unternehmerisch handeln, persönlich überzeugen. 3. Auflage. Haupt Verlag, Bern (1999).
- [54] GreenDelta: Software openLCA, Berlin (2020).
- [55] Haan, A. de, Heer, P. d.: Solving complex problems; Professional group decision-making support in highly complex situations. Eleven International Publishing, Den Haag (2012).
- [56] Haase, W., Klaus, T., et al.: Adaptive textile und folienbasierte Gebäudehüllen. Bautechnik 88 (2011), 2, S. 69–75.

- [57] Hafner, A.: Wechselwirkung Nachhaltigkeit und (Bau-)Qualität; Systemische Betrachtung des Zusammenspiels von Nachhaltigkeitsaspekten und Kriterien der (Bau-)Qualität im Sensitivitätsmodell und in der Analyse von beispielhaften Gebäuden. Dissertation, TU München, München (2012).
- [58] Hafner, A., Schäfer, S.: Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level. *Journal of Cleaner Production* 167 (2017), S. 630–642.
- [59] Häkkinen, T., Antuña, C., et al.: Sustainability and performance assessment and benchmarking of building – Final report. VTT (2012).
- [60] Harder, N., Schlegl, F., et al.: Bauphysikalische und ökologische Potenziale von adaptiven Leichtbaukonstruktionen. *Bauphysik* 40 (2018), 5, S. 307–318.
- [61] Harder, N., Schlegl, F., et al.: Bauphysikalische und ökologische Bewertung adaptiver Fassadenkonstruktionen auf Raumebene. *Bauphysik* 41 (2019), 6, S. 302–313.
- [62] Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., et al.: *Life Cycle Assessment; Theory and Practice*. Springer International Publishing, Cham (2018).
- [63] Hegger, M., Fuchs, M., et al.: *Energie Atlas; Nachhaltige Architektur*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München (2007).
- [64] Hegner, H.-D.: Bekanntmachung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung über die Nutzung und die Anerkennung von Bewertungssystemen für das nachhaltige Bauen vom 15.04.2010, https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/zertifizierung_allgemein/Bekanntmachung_BMVBS_zu_Bewertungssystemen_03-05-2010.pdf (Stand: 23.11.2020).
- [65] Heijungs, R., Hughes, M. A.J.: A Review of Approaches to Treat Uncertainty in LCA. *International Congress on Environmental Modelling and Software* (2004), 197.

- [66] Hellwig, R. T., Steiger, S., et al.: Kriterien des nachhaltigen Bauens: Bewertung des thermischen Raumklimas – ein Diskussionsbeitrag. *Bauphysik* 30 (2008), 3, S. 152–162.
- [67] Herter, K.: Adaptive Gebäudehüllen; Kategorisierung nach Funktionalität sowie die quantitative Analyse und Bewertung von Energie- und Materialeinsparungen. Masterarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart (2018).
- [68] HOAI: HOAI 2013-Textausgabe/HOAI 2013-Text Edition. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden (2013).
- [69] Hollberg, A., Lützkendorf, T., et al.: Top-down or bottom-up? – How environmental benchmarks can support the design process. *Building and Environment* 153 (2019), S. 148–157.
- [70] Honold, C., Binz, H., et al.: Planning and developing Adaptive Buildings require methodical support. *NordDesign* (2016).
- [71] Honold, C., Binz, H., et al.: Requirements Engineering für die Planung und Entwicklung adaptiver Bauwerke. *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)* (2017), S. 1–10.
- [72] Honold, C., Binz, H., et al.: Technical planning tasks and participants involved in planning Adaptive Buildings. *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)* (2017), S. 131–140.
- [73] Honold, C., Leistner, S., et al.: Anforderungen in der Entwurfsphase des integralen Planungsprozesses adaptiver Gebäude. *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung* (2019).
- [74] Honold, C.: Methodische Unterstützung der interdisziplinären Planung adaptiver Gebäude in den frühen Phasen. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart (Voraussichtlich 2021).
- [75] Huijbregts, M. A. J.: Application of uncertainty and variability in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 3 (1998), 5, S. 273–280.
- [76] Igos, E., Benetto, E., et al.: How to treat uncertainties in life cycle assessment studies? *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24 (2019), 4, S. 794–807.

- [77] IKTD: Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (2020).
- [78] Institut Bauen und Umwelt e.V.: Umwelt-Produktdeklaration; Texlon®-System, <https://epd-online.com> (Stand: 23.11.2020).
- [79] International Energy Agency and the United Nations Environment Programme: 2018 Global Status Report; Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector (2018).
- [80] IPCC: Global Warming of 1.5°C; An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (2019).
- [81] Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fachgebiet Building: BIM-basierte Integrale Planung – Projektübersicht, <http://blm.ieb.kit.edu/1313.php> (Stand: 23.11.2020).
- [82] Kauert, S.: PCM - Phase Change Materials - Erfahrungen aus EnOB-Modellprojekten und einem internationalen Hochschulwettbewerb. Forschungsinitiative EnOB (2014).
- [83] Kelleter, C., Sobek, W., et al.: Actuation of structural concrete elements under bending stress with integrated fluidic actuators. th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC) (2019).
- [84] Klöpffer, W., Grahl, B.: Ökobilanz (LCA); Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. WILEY-VCH, Weinheim (2009).
- [85] Kopatz, M.: Schluss mit der Ökomoral!; Wie wir die Welt retten, ohne ständig daran zu denken. oekom (2019).
- [86] Kosow, H., Gaßner, R.: Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse; Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien, https://www.izt.de/fileadmin/downloads/pdf/IZT_WB103.pdf (Stand: 23.11.2020).

- [87] Künzel, H. M., Kaufmann, A.: Feuchteadaptive Dampfbremse für Gebäudedämmungen.; IBP-Mitteilung, https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/1-400/201-300/268_IBPmitteilung.pdf (Stand: 23.11.2020).
- [88] Landowski, D.: Einzel- oder Generalplaner - die optimale Planereinsatzform. Springer, Berlin (2017).
- [89] Langner, N., Illner, M.: Thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 – Ein Ansatz zur vereinfachten Datenaufnahme und Berechnung für die Bewertung von Bürogebäuden. *Bauphysik* 37 (2015), 3, S. 159–168.
- [90] Larsson Ivanov, O., Honfi, D., et al.: Consideration of uncertainties in LCA for infrastructure using probabilistic methods. *Structure and Infrastructure Engineering* 15 (2019), 6, S. 711–724.
- [91] Lindemann, U., Maurer, M., et al.: Structural Complexity Management; An Approach for the Field of Product Design. Springer, Berlin (2009).
- [92] Lindner, J. P.: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi) (2020).
- [93] Lorenz, P.: Gebäude entwerfen: Grundlagen, Methoden, Arbeitshilfen. 1. Deutsche Verlag Anstalt, München (2010).
- [94] Meex, E., Hollberg, A., et al.: Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. *Building and Environment* 133 (2018), S. 228–236.
- [95] Mehra, S.-R.: Bauphysik. Vorlesung, Universität Stuttgart, Stuttgart (2019).
- [96] Meteotest AG: Meteororm, Bern (2020).
- [97] Miller, T. R., Grgory, J., et al.: Critical Issues When Comparing Whole Building & Building Product Environmental Performance. MIT Concrete Sustainability Hub (2016).
- [98] Moro: Baukonstruktion – vom Prinzip zum Detail. Springer-Verlag, Heidelberg (2009).
- [99] NBS: National BIM Report 2019; The definitive industry update (2019).

- [100] Neuhäuser, S.: Untersuchungen zur Homogenisierung von Spannungsfeldern bei adaptiven Schalenträgwerken mittels Auflagerverschiebung. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart (2014).
- [101] Olinzock, M. A., Landis, A. E., et al.: Life cycle assessment use in the North American building community; Summary of findings from a 2011/2012 survey. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20 (2015), 3, S. 318–331.
- [102] Ostertag, A., Dazer, M., et al.: Reliable Design Of Adaptive Load-Bearing Structures With Focus On Sustainability. *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference* (2020).
- [103] Probst, G. J. B., Gomez, P.: *Vernetztes Denken – ganzheitliches Führen in der Praxis*. Gabler, Wiesbaden (2004).
- [104] Reibnitz, U. von: *Szenarien - Optionen für die Zukunft*. McGraw-Hill Book Company GmbH, Hamburg (1987).
- [105] Röck, M., Hollberg, A., et al.: LCA and BIM; Integrated Assessment and Visualization of Building Elements' Embodied Impacts for Design Guidance in Early Stages. *Procedia CIRP* 69 (2018), S. 218–223.
- [106] Sartori, I., Hestnes, A. G.: Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings; A review article. *Energy and Buildings* 39 (2007), 3, S. 249–257.
- [107] Saunders, C. L., Landis, A. E., et al.: Analyzing the Practice of Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology* 16 (2013), 2, S. 777–788.
- [108] Schebek, L., Wowra, K., et al.: *Anthropogene Umweltwirkungen*. In: Kaltschmitt, M. (Hg.); Schebek, L. (Hg.): *Umweltbewertung für Ingenieure*, Springer Vieweg, Berlin (2015).
- [109] Schellnhuber, J., Rahmstorf, S., et al.: Why the right climate target was agreed in Paris. *nature climate change* (2016), 6, S. 649–653.

- [110] Schlanbusch, R. D., Fufa, S. M., et al.: Experiences with LCA in the Nordic Building Industry – Challenges, Needs and Solutions. *Energy Procedia* 96 (2016), S. 82–93.
- [111] Schlegl, F., Honold, C., et al.: Integration of LCA in the Planning Phases of Adaptive Buildings. *Sustainability* 11 (2019), 16, S. 4299.
- [112] Schlegl, F., Gantner, J., et al.: LCA of buildings in Germany: Proposal for a future benchmark based on existing databases. *Energy and Buildings* 194 (2019), S. 342–350.
- [113] Schmid, F., Haase, W., et al.: Schallschutz und akustische Wirkweise bei mehrlagigen textilen Fassadensystemen. *Bauphysik* 36 (2014), 1, S. 1–10.
- [114] Schmid, F. C.: *Methodisches Gestalten und systematisches Entwickeln am Beispiel zukünftiger Fassadenlösungen*. Springer Vieweg, Wiesbaden (2015).
- [115] schweizerischer ingenieur- und architektenverein (sia): sia-effizienzpfad energie, <https://www.sia.ch/de/themen/energie/effizienzpfad-energie/> (Stand: 23.11.2020).
- [116] Sigmund, B., Schmid, F.: Schallschutz und Raumakustik - Herausforderungen für ressourcen- und massesparende Konstruktionen, <https://www.detail.de/artikel/schallschutz-und-raumakustik-herausforderung-fuer-ressourcen-und-massesparende-konstruktionen-13364/> (Stand: 23.11.2020).
- [117] Sobek, W., Haase, W., et al.: Adaptive Systeme. *Stahlbau* 69 (2000), 7, S. 544–555.
- [118] Sobek, W.: Gebäudehüllen – Wie weiter? *Bautechnik* 91 (2014), 7, S. 506–517.
- [119] Sobek, W.: Die Zukunft des Leichtbaus: Herausforderungen und mögliche Entwicklungen. *Bautechnik* 92 (2015), 12, S.879–882.
- [120] Sobek, W., Sawodny, O., et al.: Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen; Sonderforschungsbereich 1244. Finanzierungsantrag, Universität Stuttgart, Stuttgart (2016).

- [121] Sobek, W.: Ultraleichtbau; Ultra-Lightweight Construction. GAM 12: Structural Affairs Potenziale und Perspektiven der Zusammenarbeit in Planung, Entwurf und Konstruktion / Opportunities and Perspectives for Cooperation in Planning, Design and Construction (2016), S. 155–167.
- [122] Svetozarevic, B., Begle, M., et al.: Dynamic photovoltaic building envelopes for adaptive energy and comfort management. Nature Energy 4 (2019), 8, S. 671–682.
- [123] Teuffel, P.: Entwerfen adaptiver Strukturen; Lastpfadmanagement zur Optimierung tragender Leichtbaustrukturen. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart (2004).
- [124] The American Institut of Architects (AIA): Integrated Project Delivery: A Guide, http://info.aia.org/siteobjects/files/ipd_guide_2007.pdf (Stand: 23.11.2020).
- [125] Theobald, L.: Einflussfaktoren im Lebenszyklus von adaptiven Hüllen und Strukturen. Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart (2018).
- [126] Thinkstep AG: GaBi Professional; Software und Datenbank für LCA, Echtdingen (2019).
- [127] Vandermaesen, T., Humphries, R., et al.: EU Overshoot Day; Living Beyond Nature´s Limits, https://www.footprintnetwork.org/content/uploads/2019/05/WWF_GFN_EU_Overshoot_Day_report.pdf (Stand: 23.11.2020).
- [128] Verbeeck, G., Hens, H.: Life cycle inventory of buildings; A calculation method. Building and Environment 45 (2010), 4, S. 1037–1041.
- [129] Vester, F.: Die Kunst vernetzt zu denken; Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. 10. Aufl. Deutsche Verlags-Anstalt, München (2015).
- [130] Vieweg, W.: Management in Komplexität und Unsicherheit; Für agile Manager. Springer, Wiesbaden (2015).
- [131] Vogel, M.: Wolkenkratzern einen Dämpfer verpassen. Physik Journal 14 (2015), 8/9, S. 78–79.

- [132] Weber, S.: Betoninstandsetzung. Springer Fachmedien, Wiesbaden (2013).
- [133] Weidner, S., Kelleter, C., et al.: The implementation of adaptive elements into an experimental high-rise building. *Steel Construction* 11 (2018), 2, S. 109–117.
- [134] Weidner, S., Steffen, S., et al.: The Integration of Actuation Concepts and Adaptive Elements into an Experimental High-rise Building. *The Seventh International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC)* (2019).
- [135] Weidner, S., Steffen, S., et al.: The Integration of Adaptive Elements into High-Rise Structures. *International Journal of High-Rise Buildings* (2019), 8, S. 95–100.
- [136] Zilch, K., Zehetmaier, G.: *Bemessung im konstruktiven Betonbau*. Springer-Verlag, Berlin (2006).

Anhang

Anhang A: Einflussfaktorenkatalog

Der Anhang A beinhaltet detaillierte Vorgehensschritte für die Erstellung des Einflussfaktorenkatalogs. In Anhang A.1 sind die Schritte 1 bis 3 genauer beschrieben und in Anhang A.2 ist der finale Einflussfaktorenkatalog dargestellt.

Anhang A.1: Erarbeitung des Einflussfaktorenkatalogs (Schritt 1 bis Schritt 3)

Für die Erarbeitung des Einflussfaktorenkatalogs wurde in Schritt 1 ein Expertinnenworkshop und in Schritt 2 eine Literaturrecherche durchgeführt. In Schritt 3 wurden die verschiedenen Einflussfaktoren zusammengefasst zu 21 Einflussfaktoren. Tabelle 11 zeigt in der rechten und mittleren Spalte die Einflussfaktoren des Schrittes 1 und 2. Diese sind in der linken Spalte bereits zu den 21 Einflussfaktoren aus Schritt 3 zusammengefasst und vereinheitlicht. In der Tabelle ganz unten sind zusätzliche noch Einflussfaktoren aus Schritt 1 und 2 zu sehen, die außerhalb des Untersuchungsrahmens liegen und daher ausgeschlossen wurden. Der Wortlaut aus der zweiten und dritten Spalte ist aus dem Brainstorming des Expertinnenworkshops und der Bachelorarbeit direkt zitiert, ohne sprachliche Anpassungen durchzuführen.

Tabelle 11: Zusammenfassung des Schritt 1 bis 3 für die Erarbeitung des Einflussfaktorenkatalogs

Ergebnis Schritt 3	Ergebnis Schritt 2	Ergebnis Schritt 1
Anteil erneuerbarer Ressourcen (Konstruktion)	<ul style="list-style-type: none">- Struktur- Stoff/Material- Reaktivität der Materialien- Rohstoffeinsatz/Ressourceneffizienz- Rohstoffbeschaffung- Resistenz gegen Säuren und Laugen- Bewuchs	<ul style="list-style-type: none">- Materialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe- Materialien- Entwicklung innovativer Materialien/Kombinationen- kritische Rohstoffe- Verfügbarkeit/Nachhaltigkeit der Baustoffe- Verfügbarkeit von noch nicht kommerzialisierten Materialien z.B. CNT-PVDF-Verbünde- Kunststoff- Stahl- Beton- Wasser- Zement- Sand- Notwendige Materialkennwerte

Einsatz an regenerativen Energiequellen (Betrieb)	- Sonnenschein/Einstrahldauer	
Höhe der Umweltwirkungen	- Emissionen und Wirkungskategorien - Wirkungskategorien der DGNB	- Ökobilanz/Nachhaltigkeit (Umwelt) - Umweltbelastung während Betrieb (z.B. Leckage in Hydraulik) - Biodiversität
Energieverbrauch (Betrieb pro m²)	- Energieverbrauch - Energiegewinn - Regelzeit - Anzahl der Regelungsvorgänge - Anzahl der Adaptivitätsvorgänge	- Energieverbrauch Betrieb - Energiebereitstellung (Strom, Wärme) - Energiebilanz Gebäude (U-Wert, Verschattung) - Erneuerbare Energien - Energieaufwand bei der Synthese von Partikeln (CNTs), Chemikalien (IL), Spezialkunststoffe - graue Energie - Energie (Strom) - Strombedarf für Regelung - Adaptionniveau (Lasten) - Adaptionshäufigkeit - Anzahl der Regelvorgänge - Regelzeit
Energieverbrauch (Regelenergie pro m²)		
Lebensdauer	- Lebens(zyklus)dauer	- Lebensdauer je nach Einbauort/Regelstrategie - Lebensdauer Aktorik - Lebensdauer (Wartungs-Intervalle)
Recyclingfähigkeit	- Grad der Trennbarkeit - Recyclingfähig - Abfallentstehung - Abfallaufkommen	- Recycling - Recycling / EoL Szenario Trennbarkeit - Rezyklierbarkeit, Rückbau (&Reparatur/Tausch) - Trennung der Materialien am Lebensende? (Kosten Entsorgung, Weiterverarbeitung) - Trennung Aktorik und Tragwerk im Rückbau - Trennbarkeit der Materialien - Rezyklierbarkeit ionischer Flüssigkeiten (bzw. Komposite mit ILs)
Lage	- Ausrichtung - Wetter - Regionale Unterschiede	- Azimutale Gebäudelokation – Wo steht die Hütte? Wüste (Temp-Wechsel), Nordpol (Kälte, Dunkelheit), Unter Wasser (Hai-Attacke) - Äußere Umweltbedingungen (Erdbeben, Klima, Wind) - Bemessung nach Einwirkungen (mäßig. Lastfall) Wind, Schnee, ER,Ü,E,Brand)
Nutzungsart	- Nutzungsart/-profil	- Nutzungsart
Höhe der Masse (pro m²)	- Dichte - Wichte - Quantität	- Dimensionierung - Masse
Stockwerke	- Größe	
Grundfläche	- Flächenverbrauch	

Einsatz der Anlagentechnik	<ul style="list-style-type: none"> - TGA – Technische Gebäudeausrüstung 	
Einsatz der Kybernetik	<ul style="list-style-type: none"> - Aktoren und Sensoren - Hydraulik - Infrastruktur - Aggregat 	<ul style="list-style-type: none"> - Hydraulik (Aktorkonzept) (2Mal) - Aktoren - Kontrollunit - Sensoren (2 Mal) - Infrastruktur (für Kabel etc.) - Kabel/Leitungen - Anzahl Sensoren/Aktoren - Öle in der Aktorik
Fehlerbeständigkeit bzw. -resistenz	<ul style="list-style-type: none"> - Belastbarkeit - Qualität - Sicherheit, Zuverlässigkeit - Fehlerbeständigkeit, Sicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> - Sicherheit & Zuverlässigkeit (Aktiv, Passiv) - Sicherheit - Standsicherheit/Gebrauchstauglichkeit - Teilsicherheitsbeiwert - Ausfallsicherheit (2 Mal) - Sensor-/Aktorausfall - Fehleranfälligkeit - Zuverlässigkeit (2 Mal) - Materialermüdung/ -versagen - Bautoleranzen und Dehnungsfugen
Wartungseffizienz	<ul style="list-style-type: none"> - Witterungsresistenz - Ein- & Umbaumöglichkeiten - Wartung 	<ul style="list-style-type: none"> - Haltbarkeit (2 Mal) - Austauschbarkeit - Austausch-/Upgrade Fähigkeit - Wartung - Wartungsmöglichkeiten - Zugänglichkeit bei Wartungen - Zugänglichkeit der Konstruktion
Bauphysikalische Mindestanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> - Farbe - Atmungsaktiv - Akustik - Natürliche Belichtung - Speicherfähigkeit/Dämmung - Thermische Beständigkeit - Energieabsorption und –speichervermögen; - Energietransmission - Bauphysikalische Mindestanforderungen - Wärmedurchgangskoeffizient - Wärmebrücken 	<ul style="list-style-type: none"> - Anforderungen Raumklima --> durch Materialien gegeben sein - Bauphysikalische Aspekte/Mindestanforderungen (Feuchte, Wärme, Akustik, Licht, ...) - Strahlung - Blendung - Lüftung - Wärme - Kondensatbildung in Dämmschicht (bei unzureichender Belüftung/Feuchtetransport) - Brandschutz - Klimawandel (Temperaturen, Feuchte) - Trübung transluzenter Außenmembranen - UV-Stabilität der Hüll-Materialien z.B. Membrane, Textilien, Polymere, Verbindungselemente

Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - Anforderungen der EnEV - Baurechtliche Bedingungen - Politische Rahmenbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Gesetze - Haftung - Vorschriften
Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilität - Tragfähigkeit - Funktionen/Ansprüche 	<ul style="list-style-type: none"> - Sekundärnutzen
Statik	<ul style="list-style-type: none"> - Baustatik 	<ul style="list-style-type: none"> - Sicherheitsaufschlag auf Statik - Statik - Bewehrung
Behaglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Behaglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Nutzerfreundlichkeit - Komfort – Bedingungen (2Mal) - menschliches/tierischen Wohlbefinden
Außerhalb des Untersuchungsrahmens		
	<ul style="list-style-type: none"> - Stoffeigenschaften - Wahrgenommene Qualität - Versiegelungsgrad - Zonierung - Zusammenarbeit der Funktionäre - Kostenfaktor - Soziale Akzeptanz - Erschließungssituation - Technologischer Fortschritt und Stand - Ausbildung der Verantwortlichen - Gebrauch von Computern - Planer /Akteure - Optimierungspotential - Barrierefreiheit - Beeinflussbarkeit des Zustandes durch Nutzer - „Ganzheitliche Durchdachtheit“ der Gestaltung - Transport - Datenqualität - Umnutzungsfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Identitätsstiftend - Akzeptanz - Selbstbestimmung - Nutzereinfluss/Anforderungen - Ästhetik - "Haben Will" (Coolness-Faktor, Attraktivität) - kultureller Kontext - Gesundheit - Interaktion Gebäude und Nutzer - Barrierefreiheit - Einfluss auf Umgebung (Stadt) - Stadtbild - Herstellungsmöglichkeiten - Fügefähigkeit von Außenhüllenbestandteilen (Membrane, Textilien) --> Bauzeit, Kosten, Wartung - Fertigteile - Technische Machbarkeit/Stand der Forschung - Chemische Reaktion verschiedener Materialien miteinander - Zukunftsfähigkeit? Übergangslösung? - Neue Industriezweige - Andere Sektoren (Mobilität, Industrie) - Integration neuer Technologien in den Entwurfsprozess - Zielgruppe (Gewerblich, Privat, ..) - Ziele - Wissen des Planers oder des Architekten - Ausbildung (Ing., Arch., Masch.) - Interdisziplinarität Zusammenarbeit

	<ul style="list-style-type: none"> - Vernetzung der Gebäude - Ästhetik - Verkehrsanbindung - Einhaltung der Termin/Fristen - Interdisziplinarität 	<ul style="list-style-type: none"> - Schritte der Durchführung/Logistik - Menschenrechte in Zulieferkette - Einsparungs-Potenzial (Energie, Kosten) - Betreuung nach dem Bau - Monitoring - Reinigungsfähigkeit der Außen/Innenhülle ("Kärcher") krit: Lösemittelfestigkeit, Arrosion, Feuchte, Druck - Pfusch am Bau - Kosten (2Mal) - Kosten-Effizienz - Preis - Wirtschaftlichkeit - Baustelle - Bauzeit - Einbruchschutz/Vandalismus - Vereinheitlichung - Modularität - Bepflanzbarkeit - Engineeringaufwand
--	--	---

Anhang A.2: Finaler Einflussfaktorenkatalog

In Tabelle 12 sind die Definitionen der 19 verschiedenen Einflussfaktoren dargestellt und in fünf verschiedene Cluster aufgeteilt. Die Definitionen der Einflussfaktoren wurden nicht zusätzlich in das Glossar aufgenommen.

Tabelle 12: Cluster und Definitionen der Einflussfaktoren

	Einflussfaktor	Definition
Ressourcen		
1	Materialart	Art des Materials, das pro Komponente ausgewählt wird.
2	Materialmenge	Gewicht an aufgewendetem Material pro Komponente.
3	Energiequelle	Wahl der Energiequellen des Gebäudes.
4	Endenergiebedarf im Betrieb	Endenergieverbrauch während des Betriebs durch Heizen, Lüften, Kühlen und Beleuchtung.

5	Endenergiebedarf zur Regelung	Endenergieverbrauch während des Betriebs für den Betrieb der Regelung.
6	Einsatz der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA)	Wahl der technischen Gebäudeausrüstung in Form von Wärme-, Kälte-, Lüftungstechnik sowie deren Energieträger für die Betriebsphase.
Skalierungsfaktoren		
7	Lebensdauer	Technisch mögliche Lebensdauer einer Komponente oder des gesamten Gebäudes.
8	Ausprägung der Kubatur	Abmaß einer Komponente oder der Gesamtheit der Komponenten in Höhe, Breite und Tiefe.
Externe Faktoren		
9	Standort	Der Standort des Gebäudes.
10	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Die Beachtung und Einhaltung von vorherrschenden baurechtlichen Rahmenbedingungen.
11	Nutzungsart	Nutzungsart des adaptiven Gebäudes wie zum Beispiel Büro, Kindergarten oder Labor.
Effekte auf die Umwelt		
12	Höhe der Umweltwirkungen	Höhe der Umweltwirkungen einer Komponente oder des gesamten Gebäudes.
13	Rezyklierfähigkeit	Die technisch mögliche Aufbereitung von Komponenten oder des gesamten Gebäudes an deren Lebensende.
Gebäudefunktionsanforderungen		
14	Bauphysikalische Eigenschaften	In Anlehnung an die bauphysikalischen Anforderungen der Energieeinsparverordnung für konventionelle Gebäude müssen adaptive Komponenten hinsichtlich der bauphysikalischen Eigenschaften ausgelegt werden.
15	Statik und konstruktive Durchbildung	Stand sicheres Gebäude im passiven Zustand sowie deren Gebrauchstauglichkeit bei äußerer Einwirkung durch Unterstützung der Adaptivität. Außerdem die Ausführbarkeit des Geplanten durch die konstruktive Durchbildung.

16	Thermische Behaglichkeit	Die thermische Behaglichkeit ist das „Gefühl, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt“. [31]
17	Fehlerresilienz	Die Widerstandsfähigkeit der Komponenten gegenüber Fehleranfälligkeit.
18	Auslegung des adaptiven Systems	Wahl der Art, Anzahl und Lage der Aktoren, Sensoren, weiterer technischer Komponenten und der Regelungseinheit mit dem dahinterstehenden Algorithmus und Regelungsstrategien.
19	Instandhaltungsfreundlichkeit	Die Bewahrung des ursprünglichen Zustands (Soll-Zustand) und Beurteilung des aktuellen Zustands (Ist-Zustand) von Komponenten und des gesamten Gebäudes sowie die Verbesserung und Modernisierung.

Anhang B: Einflussmatrix

In Anhang B sind Hintergrundinformationen für die Erstellung und Visualisierung der Einflussmatrix dargestellt. In Anhang B.1 sind alle 14 Einflussmatrizen abgebildet, die von den 26 Expertinnen ausgefüllt wurden. In Anhang B.2 sind zwei Visualisierungen der finalen Einflussmatrix dargestellt.

Anhang B.1: 14 verschiedene Einflussmatrizen der befragten Expertinnen

Im Nachfolgenden sind die 14 verschiedenen Einflussmatrizen dargestellt. Diese stellen die Rohdaten für die Erstellung der finalen Einflussmatrix dar. Es sind jeweils die Wechselwirkungen mit einer Zahl zwischen 0 und 3 befüllt, die von den Expertinnen bewertet wurden. Alle leeren Felder wurden nicht betrachtet. In der Beschriftung der Tabelle ist zu sehen, welche Expertin(nen) die Einflussmatrix jeweils ausgefüllt haben. Für eine bessere Übersichtlichkeit sind die Tabellen zudem durchnummeriert.

Tabelle 13: Ausgefüllte Einflussmatrix einer Ökobilanzexpertin (Autorin)
(1)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme
Materialart	-	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	2	3	2	1	0	3	3	0	17
Materialmenge	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	2	0	3	2	0	12
Energiequellen	0	0	-	0	0	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	5
Endenergiebedarf Betrieb	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	5
Endenergiebedarf Regelung	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	4
Einsatz TGA	2	0	2	3	0	-	0	1	0	0	0	2	0	0	1	1	3	0	1	16
Lebensdauer	1	1	0	0	0	0	-	0	3	0	0	2	0	0	2	0	1	0	0	10
Ausprägung Kubatur	0	2	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	2	3	0	1	2	0	10
Standort	2	2	3	1	1	2	2	2	-	3	2	0	0	0	3	0	0	2	0	25
Baurechtliche Rahmenbedingungen	1	0	1	1	0	1	0	1	2	-	0	0	2	2	2	0	2	0	2	17
Nutzungsart	1	0	0	2	0	2	2	3	3	2	-	0	0	0	2	0	0	2	0	19
Höhe Umweltwirkungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Rezyklierfähigkeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	-	0	0	0	0	0	1	4
Bauphysikalische Eigenschaften	0	0	0	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	-	0	2	0	0	2	7
Statik, konstruktive Durchbildung	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	3	0	-	0	2	0	2	10
Thermische Behaglichkeit	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	2
Fehlerresilienz	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-	0	2	5
Auslegung adaptives System	0	1	0	0	3	0	3	0	0	0	0	2	1	1	0	2	1	-	1	14
Instandhaltungsfreundlichkeit	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	-	6
Passivsumme	7	6	6	9	4	8	19	7	8	6	2	21	11	9	16	10	18	11	11	-

Tabelle 14: Ausgefüllte Einflussmatrix einer Ökobilanzexpertin (2)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme
Materialart	-	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	3	2	2	0	3	2	1	16
Materialmenge	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	2	0	3	2	0	11
Energiequellen	0	0	-	0	0	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	5
Endenergiebedarf Betrieb	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	4
Endenergiebedarf Regelung	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	4
Einsatz TGA	0	0	2	1	0	-	0	1	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	1	9
Lebensdauer	1	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	3
Ausprägung Kubatur	0	1	0	0	0	0	0	-	0	0	1	0	0	1	2	1	0	0	0	6
Standort	2	0	2	1	1	2	2	2	-	3	2	0	0	0	3	0	0	2	0	22
Baurechtliche Rahmenbedingungen	2	1	1	1	1	1	0	1	1	-	1	1	1	1	1	1	0	0	1	16
Nutzungsart	0	0	0	0	0	2	2	3	3	2	-	0	0	0	0	0	0	0	0	12
Höhe Umweltwirkungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Rezyklierfähigkeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	-	0	0	0	0	0	0	3
Bauphysikalische Eigenschaften	0	0	0	3	1	0	3	0	0	0	0	0	0	-	0	2	0	0	0	6
Statik, konstruktive Durchbildung	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0	-	0	1	2	2	9
Thermische Behaglichkeit	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	1
Fehlerresilienz	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	1	0	0	-	0	2	7
Auslegung adaptives System	0	2	0	0	2	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	2	1	-	1	12
Instandhaltungsfreundlichkeit	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	-	6
Passivsumme	5	4	5	4	5	8	16	7	4	5	4	20	9	7	12	12	10	8	8	-

Tabelle 15: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (3)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme
Materialart	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	1	0	0	0	6
Materialmenge	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	3
Energiequellen	0	0	-	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3
Endenergiebedarf Betrieb	0	0	0																	
Endenergiebedarf Regelung	0	0	0																	
Einsatz TGA	1	0	2																	
Lebensdauer	0	0	0																	
Ausprägung Kubatur	0	1	0																	
Standort	2	0	1																	
Baurechtliche Rahmenbedingungen	1	0	2																	
Nutzungsart	0	0	0																	
Höhe Umweltwirkungen	0	0	0																	
Rezyklierfähigkeit	0	0	0																	
Bauphysikalische Eigenschaften	0	0	0																	
Statik, konstruktive Durchbildung	0	0	0																	
Thermische Behaglichkeit	0	0	0																	
Fehlerresilienz	0	0	0																	
Auslegung adaptives System	0	2	0																	
Instandhaltungsfreundlichkeit	0	0	0																	
Passivsumme	4	3	5																	

Tabelle 16: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (4)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme	
Materialart				0	1	2															
Materialmenge				2	2	2													2		
Energiequellen				0	1	1													1		
Endenergiebedarf Betrieb	1	1	0	-	2	2	1	0	0		0	2	0	2	0	2	0	1	0		14
Endenergiebedarf Regelung	1	0	0	1	-	0	0	0	0		0	2	0	1	0	2	0	0	0		7
Einsatz TGA	2	1	1	2	2	-	1	0	0		1	1	1	2	1	1	2	2	2		22
Lebensdauer				0	0	2												1			
Ausprägung Kubatur				2	2	2													2		
Standort				2	2	2													2		
Baurechtliche Rahmenbedingungen																					
Nutzungsart				2	2	2													2		
Höhe Umweltwirkungen				0	0	0													0		
Rezyklierfähigkeit				2	1	0													0		
Bauphysikalische Eigenschaften				2	2	0													0		
Statik, konstruktive Durchbildung				0	2	1													2		
Thermische Behaglichkeit				2	2	2													2		
Fehlerresilienz				0	1	1													1		
Auslegung adaptives System	1	2	1	1	2	1	1	0	0		1	1	1	2	0	1	2	-	2		17
Instandhaltungsfreundlichkeit				0	0	0													0		
Passivsumme				17	24	20													19		

Tabelle 17: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (5)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme	
Materialart							2	0				1									
Materialmenge							1	0				2									
Energiequellen							0	0				1									
Endenergiebedarf Betrieb							0	0				2									
Endenergiebedarf Regelung							0	0				2									
Einsatz TGA							0	0				2									
Lebensdauer	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Ausprägung Kubatur	0	1	0	1	1	3	0	-	0	0	0	1	0	0	2	0	0	2	0	0	11
Standort							2	0				0									
Baurechtliche Rahmenbedingungen							0	2				0									
Nutzungsart							0	2				0									
Höhe Umweltwirkungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rezyklierfähigkeit							0	0				1									
Bauphysikalische Eigenschaften							1	0				2									
Statik, konstruktive Durchbildung							0	0				0									
Thermische Behaglichkeit							0	0				0									
Fehlerresilienz							1	0				0									
Auslegung adaptives System							0	0				1									
Instandhaltungsfreundlichkeit							3	0				2									
Passivsumme							10	4				19									

Tabelle 18: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (6)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme
Materialart									0	0							0			
Materialmenge									0	0							0			
Energiequellen									0	0							0			
Endenergiebedarf Betrieb									0	0							0			
Endenergiebedarf Regelung									0	0							0			
Einsatz TGA									0	0							2			
Lebensdauer									0	0							1			
Ausprägung Kubatur									0	0							1			
Standort	1	1	1	2	1	2	1	1	-	0	1	0	0	0	1	0	0	2	0	14
Baurechtliche Rahmenbedingungen	2	0	2	2	0	2	1	1	1	-	1	0	2	2	0	0	1	0	0	17
Nutzungsart									1	0							0			
Höhe Umweltwirkungen									0	0							0			
Rezyklierfähigkeit									0	0							0			
Bauphysikalische Eigenschaften									0	0							0			
Statik, konstruktive Durchbildung									0	0							1			
Thermische Behaglichkeit									0	0							0			
Fehlerresilienz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0
Auslegung adaptives System									0	0							2			
Instandhaltungsfreundlichkeit									0	0							1			
Passivsumme									2	0							9			

Tabelle 19: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (7)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme	
Materialart				0		0															
Materialmenge				0		0															
Energiequellen				0		0															
Endenergiebedarf Betrieb	0	0	0	-	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0		6
Endenergiebedarf Regelung				0		0															
Einsatz TGA	2	1	2	1	0	-	2	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	2		14
Lebensdauer				0		1															
Ausprägung Kubatur				2		2															
Standort				2		2															
Baurechtliche Rahmenbedingungen				1		1															
Nutzungsart				2		2															
Höhe Umweltwirkungen				0		0															
Rezyklierfähigkeit				0		0															
Bauphysikalische Eigenschaften				2		0															
Statik, konstruktive Durchbildung				0		0															
Thermische Behaglichkeit				1		0															
Fehlerresilienz				0		0															
Auslegung adaptives System				1		1															
Instandhaltungsfreundlichkeit				0		1															
Passivsumme				10		10															

Tabelle 20: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (8)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme	
Materialart											0				0						
Materialmenge											0				0						
Energiequellen											0				0						
Endenergiebedarf Betrieb											1				0						
Endenergiebedarf Regelung											1				0						
Einsatz TGA											0				0						
Lebensdauer											2				2						
Ausprägung Kubatur											1				2						
Standort											3				2						
Baurechtliche Rahmenbedingungen											3				2						
Nutzungsart	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	-	0	0	2	2	0	0	0	2		17
Höhe Umweltwirkungen											0				2						
Rezyklierfähigkeit											0				0						
Bauphysikalische Eigenschaften											1				0						
Statik, konstruktive Durchbildung	1	2	0	0	0	0	2	1	2	0	0	2	2	1	-	0	0	0	2		15
Thermische Behaglichkeit											0				0						
Fehlerresilienz											0				0						
Auslegung adaptives System											0				0						
Instandhaltungsfreundlichkeit											2				2						
Passivsumme											14				14						

Tabelle 21: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (9)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme
Materialart						0							0					0	0	
Materialmenge						0							0					0	0	
Energiequellen						0							0					0	0	
Endenergiebedarf Betrieb						0							0					0	0	
Endenergiebedarf Regelung						0							0					0	0	
Einsatz TGA	3	0	3	3	0	-	0	1	0	0	1	3	3	0	0	2	2	0	3	24
Lebensdauer						0							0					0	0	
Ausprägung Kubatur						0							0					0	0	
Standort						3							1					3	3	
Baurechtliche Rahmenbedingungen						3							0					0	0	
Nutzungsart						0							0					3	3	
Höhe Umweltwirkungen						0							0					0	0	
Rezyklierfähigkeit	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	-	0	0	0	0	0	2	6
Bauphysikalische Eigenschaften						0							0					0	0	
Statik, konstruktive Durchbildung						0							0					0	0	
Thermische Behaglichkeit						0							0					0	0	
Fehlerresilienz						0							0					0	0	
Auslegung adaptives System	1	1	0	0	3	0	1	1	0	0	1	2	1	0	0	2	3	-	2	16
Instandhaltungsfreundlichkeit	0	2	0	0	0	0	2	1	0	0	0	2	2	0	0	0	2	0	-	11
Passivsumme						7							7					6	13	

Tabelle 22: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Ökobilanzexpertinnen (10)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme	
Materialart														0	0						
Materialmenge														0	0						
Energiequellen														0	0						
Endenergiebedarf Betrieb														0	0						
Endenergiebedarf Regelung														0	0						
Einsatz TGA														0	0						
Lebensdauer														0	0						
Ausprägung Kubatur														0	0						
Standort														0	0						
Baurechtliche Rahmenbedingungen														0	0						
Nutzungsart														0	0						
Höhe Umweltwirkungen														0	0						
Rezyklierfähigkeit														0	0						
Bauphysikalische Eigenschaften	0	2	0	3	0	0	3	1	0	0	0	0	0	-	0	3	0	0	0	0	9
Statik, konstruktive Durchbildung														0	0						
Thermische Behaglichkeit	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	1
Fehlerresilienz														0	0						
Auslegung adaptives System														0	0						
Instandhaltungsfreundlichkeit														0	0						
Passivsumme														0	3						

Tabelle 23: Ausgefüllte Einflussmatrix einer Behaglichkeitsexpertin (11)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme	
Materialart																0					
Materialmenge																0					
Energiequellen																0					
Endenergiebedarf Betrieb																3					
Endenergiebedarf Regelung																2					
Einsatz TGA																2					
Lebensdauer																0					
Ausprägung Kubatur																0					
Standort																0					
Baurechtliche Rahmenbedingungen																0					
Nutzungsart																1					
Höhe Umweltwirkungen																0					
Rezyklierfähigkeit																0					
Bauphysikalische Eigenschaften																3					
Statik, konstruktive Durchbildung																0					
Thermische Behaglichkeit	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0		2
Fehlerresilienz																1					
Auslegung adaptives System																2					
Instandhaltungsfreundlichkeit																0					
Passivsumme																14					

Tabelle 24: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Statikexpertinnen (12)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme	
Materialart															2						
Materialmenge															2						
Energiequellen															0						
Endenergiebedarf Betrieb															0						
Endenergiebedarf Regelung															0						
Einsatz TGA															2						
Lebensdauer															2						
Ausprägung Kubatur															3						
Standort															3						
Baurechtliche Rahmenbedingungen															2						
Nutzungsart															3						
Höhe Umweltwirkungen															0						
Rezyklierfähigkeit															0						
Bauphysikalische Eigenschaften															1						
Statik, konstruktive Durchbildung	1	2	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	2	3	-	0	3	3	2		19
Thermische Behaglichkeit															0						
Fehlerresilienz															0						
Auslegung adaptives System															1						
Instandhaltungsfreundlichkeit															0						
Passivsumme															21						

Tabelle 25: Ausgefüllte Einflussmatrix einer Bauphysikexpertin (13)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme	
Materialart														0							
Materialmenge														2							
Energiequellen														0							
Endenergiebedarf Betrieb														0							
Endenergiebedarf Regelung														0							
Einsatz TGA														0							
Lebensdauer														0							
Ausprägung Kubatur														2							
Standort														2							
Baurechtliche Rahmenbedingungen														2							
Nutzungsart														3							
Höhe Umweltwirkungen														1							
Rezyklierfähigkeit														0							
Bauphysikalische Eigenschaften	0	0	0	2	2	0	3	0	2	0	1	0	0	-	0	3	0	0	2		13
Statik, konstruktive Durchbildung														0							
Thermische Behaglichkeit														0							
Fehlerresilienz														1							
Auslegung adaptives System														0							
Instandhaltungsfreundlichkeit														0							
Passivsumme														13							

Tabelle 26: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Expertinnen aus dem Bereich der adaptiven Gebäudeplanung (14)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme	
Materialart	-	1	0	1	1	1	2	0	0	0	1	3	3	3	3	1	2	2	2	2	26
Materialmenge	0	-	0	0	2	1	1	2	0	0	0	3	0	3	3	0	2	1	1	1	19
Energiequellen	0	0					0	0	0	0	0		0				0		0		
Endenergiebedarf Betrieb	1	0					0	0	0	0	0		0				0		0		
Endenergiebedarf Regelung	1	1					0	0	0	0	0		0				0		0		
Einsatz TGA	0	0					2	0	0	0	0		2				3		3		
Lebensdauer	1	1	0	2	1	1	-	0	0	0	0	2	0	1	2	0	1	2	1	1	15
Ausprägung Kubatur	0	2	0	2	2	2	0	-	0	0	0	2	0	3	3	0	1	2	0	0	19
Standort	1	2	2	2	2	2	1	2	-	0	0	0	0	0	3	0	0	3	1	1	21
Baurechtliche Rahmenbedingungen	1	1	2	3	0	2	0	2	0	-	3	0	1	3	3	0	2	0	2	2	25
Nutzungsart	2	3	1	3	1	2	2	3	2	3	-	2	0	3	2	3	1	1	1	1	35
Höhe Umweltwirkungen	0	0					0	0	0	0	0		0				0		0		
Rezyklierfähigkeit	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	-	1	0	0	0	0	0	0	6
Bauphysikalische Eigenschaften	0	0					2	0	0	0	0		0				1		0		
Statik, konstruktive Durchbildung	2	3					2	0	0	0	0		3				2		3		
Thermische Behaglichkeit	1	0					0	0	0	0	0		0				0		0		
Fehlerresilienz	1	1	0	2	1	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	-	0	2	2	11
Auslegung adaptives System	1	1					3	1	0	0	0		2				3		3		
Instandhaltungsfreundlichkeit	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	0	-	-	8
Passivsumme	12	16					21	11	2	3	5		12				21	11	19		

Tabelle 27: Ausgefüllte Einflussmatrix zweier Kybernetikexpertinnen (15)

	Materialart	Materialmenge	Energiequellen	Endenergiebedarf Betrieb	Endenergiebedarf Regelung	Einsatz TGA	Lebensdauer	Ausprägung Kubatur	Standort	Baurechtliche Rahmenbedingungen	Nutzungsart	Höhe Umweltwirkungen	Rezyklierfähigkeit	Bauphysikalische Eigenschaften	Statik, konstruktive Durchbildung	Thermische Behaglichkeit	Fehlerresilienz	Auslegung adaptives System	Instandhaltungsfreundlichkeit	Aktivsumme	
Materialart					1														1		
Materialmenge					2														2		
Energiequellen					0														0		
Endenergiebedarf Betrieb					0														0		
Endenergiebedarf Regelung	0	1	0	0	-	0	1	2	0	0	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0	10
Einsatz TGA					0														0		
Lebensdauer					1														2		
Ausprägung Kubatur					2														2		
Standort					1														1		
Baurechtliche Rahmenbedingungen					0														0		
Nutzungsart					0														1		
Höhe Umweltwirkungen					0														0		
Rezyklierfähigkeit					0														0		
Bauphysikalische Eigenschaften					0														0		
Statik, konstruktive Durchbildung					0														2		
Thermische Behaglichkeit					0														0		
Fehlerresilienz					0														1		
Auslegung adaptives System	0	1	0	0	3	0	2	2	0	0	0	1	0	0	1	0	2	-	2	2	12
Instandhaltungsfreundlichkeit					0														1		
Passivsumme					10														15		

Anhang B.2: Visualisierungen der Einflussmatrix

In Abbildung 45 und Abbildung 46 sind zwei Visualisierungsformen der Einflussmatrix abgebildet. Die Wechselwirkungen mit der Höhe der Umweltwirkungen, sind in blau hervorgehoben.

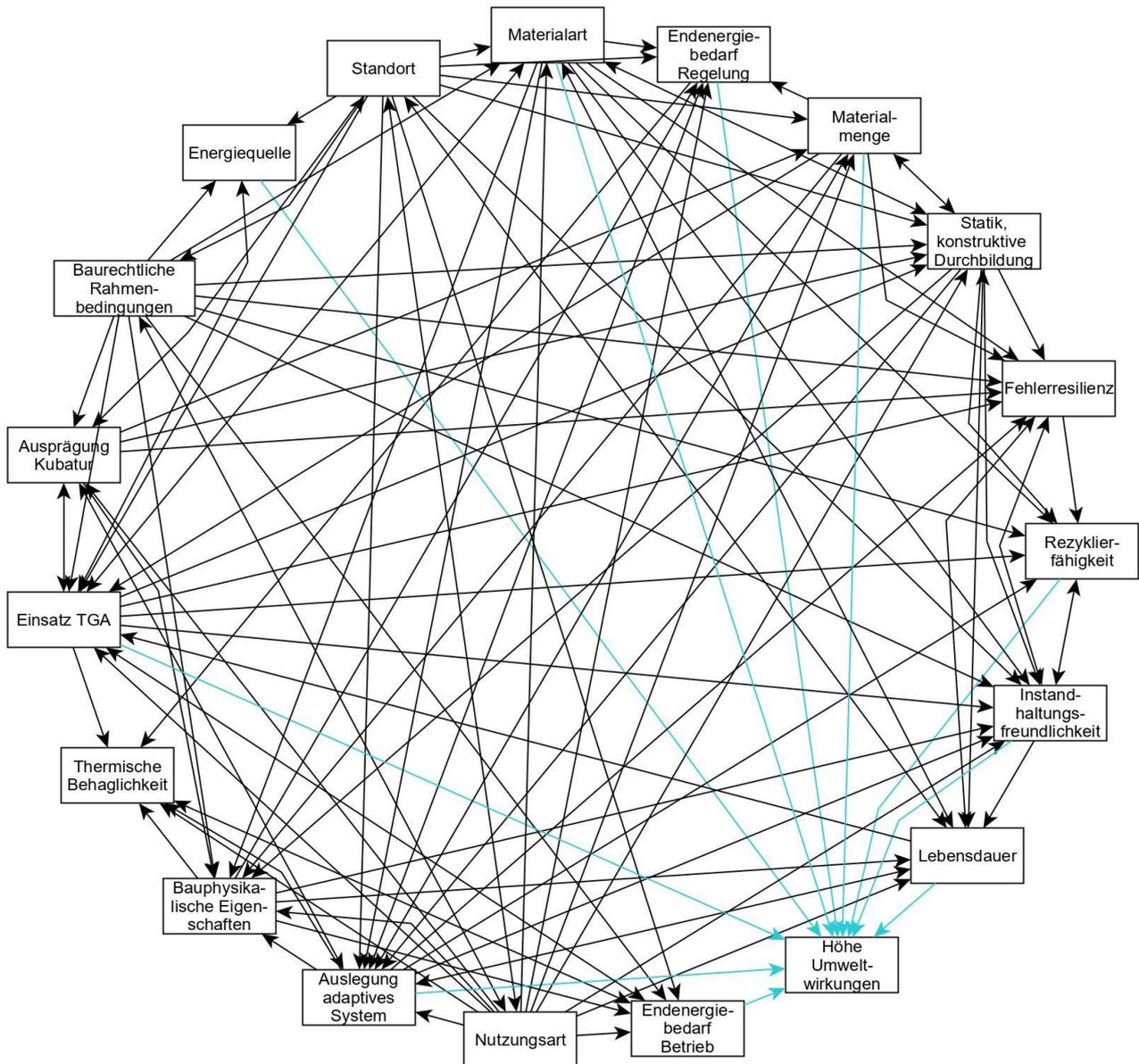


Abbildung 45: Wechselwirkungsanalyse in Kreisform

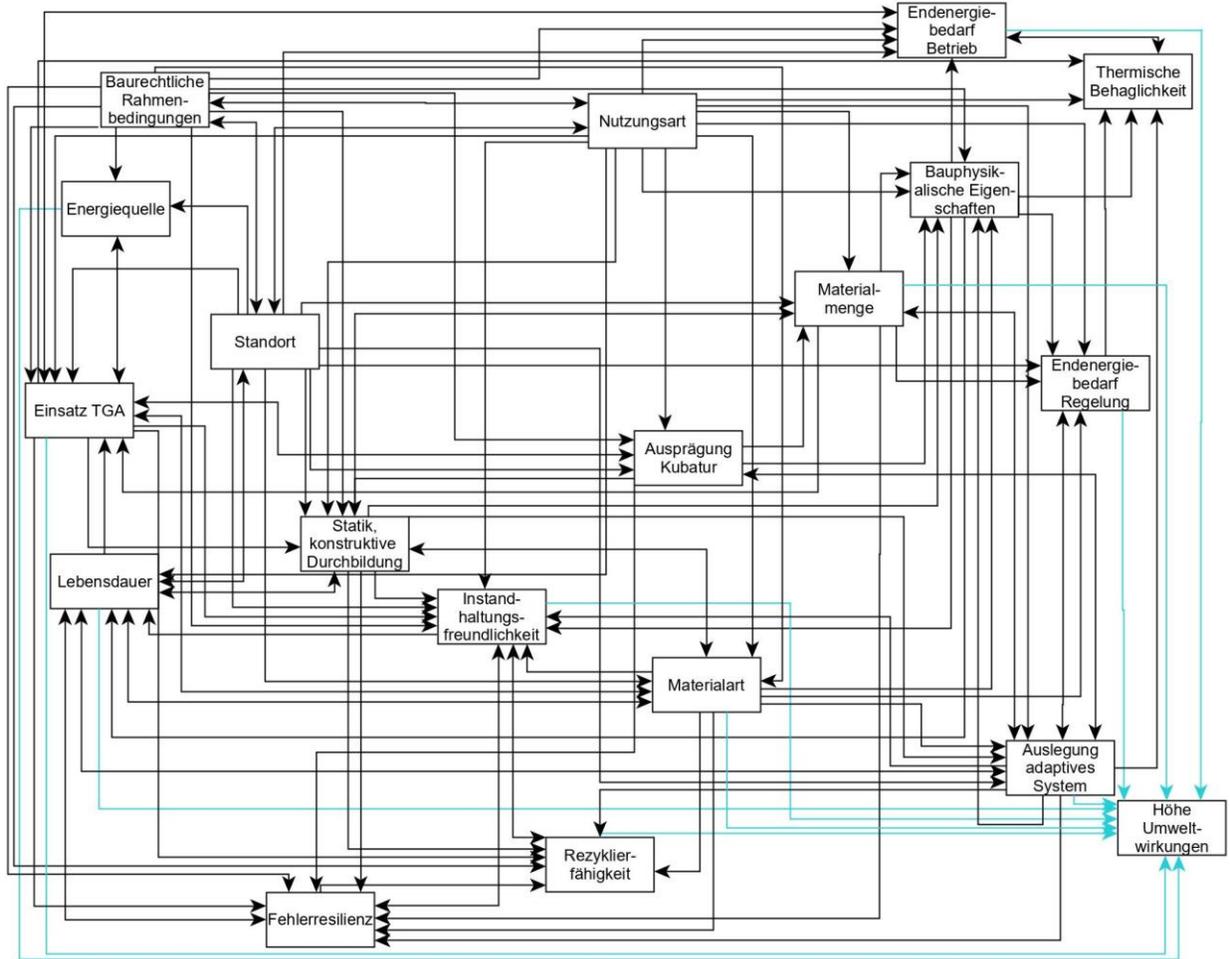


Abbildung 46: Wechselwirkungsanalyse in orthogonaler Form

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name	Friederike van den Adel, geb. Schlegl
Geburtsdatum	05.09.1991
Geburtsort	Reutlingen

Berufliche Tätigkeiten

Seit 02/2021	Ingenieurin/Beraterin für Energieeffizienz und Klimaschutz, Energieagentur Südwest GmbH in Lörrach
06/2017-01/2021	Wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung GaBi, Institut für Akustik und Bauphysik IABP, Universität Stuttgart
09/2013-02/2014	Praktikum im Operations Quality bei Philips Medical Systems in Hamburg
2010-2011	Freiwilliges Soziales Jahr, Onkologische Tagesklinik, Frauenklinik in Tübingen

Schulbildung und Studium

2015-2017	Master Wirtschaftsingenieurwesen (Maschinenbau), Technische Universität Braunschweig
2011-2015	Bachelor Wirtschaftsingenieurwesen (Maschinenbau), Technische Universität Braunschweig
2007-2010	Abitur, Technisches Gymnasium, Ferdinand-von-Steinbeis-Schule in Reutlingen

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbst, lediglich unter Benutzung der aufgeführten Literatur und ohne fremde Hilfe angefertigt worden ist.

Stuttgart, den 24.11.2020

Friederike van den Adel

Der enorme Ressourcenverbrauch im konventionellen Gebäudebau verursacht fast 40 % des gesamten anthropogenen Beitrags zum Klimawandel. Die Integration adaptiver Systeme in die Gebäudebauteile ermöglicht Gebäuden sich flexibel an Veränderungen in der Umgebung anzupassen, wodurch auf statische Masse verzichtet werden kann. Um adaptive Gebäude zu gestalten, ist ein neuartiger Planungsprozess notwendig, in dem Umweltaspekte von Beginn an mitbeachtet werden.

In der vorliegenden Arbeit wird die Methodik ActUate entwickelt, die die Abschätzung lebenszyklusbezogener Umweltwirkungen im Planungsprozess adaptiver Gebäude von Beginn an ermöglicht. Der Methodik liegt dabei eine umfassende Systemuntersuchung zugrunde, die die komplexen Wechselwirkungen im System berücksichtigt. Mit ActUate können Gebäudeentwürfe und -konzepte hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen abgeschätzt werden, um fallspezifisch geeignete adaptive Systeme für Gebäude zu konzipieren. Dadurch lassen sich die neuartigen adaptiven Gebäude bereits vor ihrem Betrieb auf ihre Umweltverträglichkeit hin testen und Umweltwirkungen über ihren gesamten Lebenszyklus reduzieren.

ISBN 978-3-8396-1727-4



9 783839 617274