

# Modellentwicklung zur Ermittlung der grauen Energie und Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen unter Berücksichtigung einer CO<sub>2</sub>-Besteuerung

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades  
M.Sc. Bauingenieurwesen  
an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften Bau, Geo Umwelt der  
Technischen Universität München.

**Betreut von** Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lang  
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

**Eingereicht von** Florian Perkuhn  
Landwehrstraße 63  
80336 München  
+49 176 64951997

**Eingereicht am** München, den 06.02.2022

# Vereinbarung

zwischen

der Technischen Universität München, vertreten durch ihren Präsidenten,  
Arcisstraße 21, 80290 München

hier handelnd der Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen  
(Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lang), Arcisstr. 21, 80333 München

– nachfolgend TUM –

und

Herrn Florian Perkuhn

Landwehrstraße 63,  
80336 München

– nachfolgend Autorin/Autor –

Der Autor wünscht, dass die von ihm an der TUM erstellte Masterarbeit mit dem Titel

## **Modellentwicklung zur Ermittlung der grauen Energie und Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen unter Berücksichtigung einer CO2-Besteuerung**

auf mediaTUM und der Webseite des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen mit dem Namen des Verfassers, dem Titel der Arbeit, den Betreuer/innen und dem Erscheinungsjahr genannt werden darf.

in Bibliotheken der TUM, einschließlich mediaTUM und die Präsenzbibliothek des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, Studenten und Besuchern zugänglich gemacht und veröffentlicht werden darf. Dies schließt auch Inhalte von Abschlusspräsentationen ein.

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weitergegeben wird.

(Zutreffendes bitte ankreuzen)

Zu diesem Zweck überträgt die Autorin / der Autor der TUM zeitlich und örtlich unbefristet das nichtausschließliche Nutzungs- und Veröffentlichungsrecht an der Masterarbeit.

Die Autorin / der Autor versichert, dass sie/er alleinige(r) Inhaber(in) aller Rechte an der Masterarbeit ist und der weltweiten Veröffentlichung keine Rechte Dritter entgegenstehen, bspw. an Abbildungen, beschränkende Absprachen mit Verlagen, Arbeitgebern oder Unterstützern der Masterarbeit. Die Autorin / der Autor stellt die TUM und deren Beschäftigte insofern von Ansprüchen und Forderungen Dritter sowie den damit verbundenen Kosten frei.

Eine elektronische Fassung der Masterarbeit als pdf-Datei hat die Autorin / der Autor dieser Vereinbarung beigelegt. Die TUM ist berechtigt, ggf. notwendig werdende Konvertierungen der Datei in andere Formate vorzunehmen.

Vergütungen werden nicht gewährt.

Eine Verpflichtung der TUM zur Veröffentlichung für eine bestimmte Dauer besteht nicht.

Die Autorin / der Autor hat jederzeit das Recht, die mit dieser Vereinbarung eingeräumten Rechte schriftlich zu widerrufen. Die TUM wird die Veröffentlichung nach dem Widerruf in einer angemessenen Frist und auf etwaige Kosten der Autorin / des Autors rückgängig machen, soweit rechtlich und tatsächlich möglich und zumutbar.

Die TUM haftet nur für vorsätzlich oder grob fahrlässig verursachte Schäden. Im Falle grober Fahrlässigkeit ist die Haftung auf den vorhersehbaren Schaden begrenzt; für mittelbare Schäden, Folgeschäden sowie unbefugte nachträgliche Veränderungen der veröffentlichten Masterarbeit ist die Haftung bei grober Fahrlässigkeit ausgeschlossen.

Die vorstehenden Haftungsbeschränkungen gelten nicht für Verletzungen des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit.

Meinungsverschiedenheiten im Zusammenhang mit dieser Vereinbarung bemühen sich die TUM und die Autorin / der Autor einvernehmlich zu klären. Auf diese Vereinbarung findet deutsches Recht unter Ausschluss kollisionsrechtlicher Regelungen Anwendung. Ausschließlicher Gerichtsstand ist München.

München, den

München, den 06.02.2022

.....

.....

(TUM)

(Autorin/Autor)

# Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

---

Ort, Datum, Unterschrift

## Kurzzusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Modell für die Baukonstruktion von Wohngebäuden entwickelt, das ermöglicht, in frühen Konzeptions- und Planungsphasen mittels neun Eingabeparametern den Verbrauch von grauer Energie, die fossilen Treibhausgasemissionen und die Lebenszykluskosten sowohl mit als auch ohne eine CO<sub>2</sub>-Steuer auf fossile Treibhausgasemissionen zu ermitteln. Berücksichtigt werden im Rahmen der Arbeit alle Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15804:2020-03, bis auf die Phasen B1-B3 sowie B5-B7.

Es werden insbesondere zwei verschiedene Bauweisen – Stahlbeton- und Holzbau – verglichen. Dabei liegt der Fokus auf einer vergleichenden Analyse der Auswirkungen auf die oben genannten Ausgabewerte. Auf Basis der Ergebnisse wird ferner untersucht, wie sich eine CO<sub>2</sub>-Besteuerung auf die Lebenszykluskosten auswirken und ob sich daraus ein Kostenvorteil zugunsten der Holzbauweise ergeben würde.

Die Anwendung des Modells hat anhand eines Realbeispiels folgende Ergebnisse hervorgebracht. Die Holzbauweise verbraucht über den Lebenszyklus (Phasen A-C) 6,1 % weniger graue Energie und emittiert 25,2 % weniger fossile Treibhausgase als die Standardbauweise. Darüber hinaus weist sie bei beiden Umweltwirkindikatoren ein 706,0 % bzw. 752,0 % höheres End-of-Life-Potenzial (Phase D) auf.

Die Lebenszykluskosten der Holzbauweise sind ohne CO<sub>2</sub>-Besteuerung 1,9 % höher als bei der Stahlbetonbauweise. Eine CO<sub>2</sub>-Besteuerung führt grundsätzlich zu einer Steigerung der Lebenszykluskosten beider Bauweisen. Aufgrund der geringeren fossilen Treibhausgasemissionen bei der Holzbauweise erweist sich die absolute Kostensteigerung geringer als bei der Stahlbetonbauweise. Je höher die CO<sub>2</sub>-Bepreisung angesetzt wird, desto geringer ist die Kostendifferenz beider Bauweisen. Ab einem CO<sub>2</sub>-Preis von 255 € pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. weist die Holzbauweise geringere Gesamtkosten auf.

## Summary

In the scope of the present work, a model for the construction of residential buildings was developed that enables by means of nine input parameters to determine the consumption of embodied energy, fossil greenhouse gas emissions and life-cycle costs both with and without a CO<sub>2</sub> tax on fossil greenhouse gas emissions in early conception and planning phases. The model considers all life-cycle phases according to DIN EN 15804:2020-03, except for the phases B1-B3 as well as B5-B7.

In particular, two different construction methods - reinforced concrete and timber construction - are compared. The focus is on a comparative analysis of the effects on the above-mentioned output values. Based on the results, it is also evaluated how an imposed CO<sub>2</sub> tax would affect the life-cycle costs and whether this would result in a cost advantage in favor of timber construction.

The application of the model, using a real-world case, generates the following results. Over the life-cycle (Phases A-C), timber construction consumes 6.1% less embodied energy and emits 25.2% less fossil greenhouse gases than the standard construction. It also exhibits 706.0% and 752.0% higher end-of-life potential (Phase D) for both environmental impact indicators.

The life-cycle cost of timber construction without CO<sub>2</sub> taxation is 1.9% higher than that of reinforced concrete construction. In general, CO<sub>2</sub> taxation leads to an increase in the life-cycle costs of both construction methods. Due to the lower fossil greenhouse gas emissions in timber construction, the absolute cost increase proves to be lower than in reinforced concrete construction. The higher the CO<sub>2</sub> price, the smaller the cost difference of both construction methods. Above a CO<sub>2</sub> price of 255 € per ton of CO<sub>2</sub> eq., the timber construction shows lower total costs.

1.	Einleitung .....	1
1.1.	Problemstellung .....	1
1.2.	Zielsetzungen und Hypothese der Arbeit .....	3
1.3.	Aufbau der Arbeit.....	4
2.	Theoretischer Hintergrund .....	5
2.1.	Ganzheitliche Betrachtung ökologischer Aspekte von Bauwerken .....	5
2.1.1.	Ökobilanzierung.....	5
2.1.2.	Lebenszyklusphasen .....	9
2.1.3.	Umweltdeklarationen .....	11
2.1.4.	Ökobilanzdatenbanken .....	11
2.1.5.	Graue Energie .....	13
2.1.6.	Treibhauspotenzial fossiler Energieträger und Stoffen.....	14
2.1.7.	Relevanz von grauer Energie und fossilen Treibhausgasemissionen bei Gebäuden .....	15
2.2.	Ganzheitliche Betrachtung ökonomischer Aspekte von Bauwerken .....	15
2.2.1.	Kostenplanung.....	15
2.2.2.	Lebenszykluskostenrechnung .....	19
3.	Methodik der Arbeit.....	23
3.1.1.	Definition eines Standards.....	23
3.1.2.	Modellentwicklung .....	23
3.1.3.	Anwendung und Validierung mit Realbeispiel .....	24
4.	Modellentwicklung.....	25
4.1.	Grundlagen des Modells.....	25
4.1.1.	Ziele des Modells und Definition eines Baustandards.....	25
4.1.2.	Spezifika Wohngebäude.....	25
4.1.3.	Standardmodule .....	26
4.1.4.	Alternativmodule .....	27
4.1.5.	Aufbau Datenblatt.....	27
4.2.	Anforderungen und Annahmen des Modells .....	30
4.2.1.	Gesetzliche Anforderungen .....	30
4.2.2.	Annahmen äußerer Bedingungen .....	35
4.2.3.	Baukonstruktive Grundannahmen .....	35
4.2.4.	Annahmen bestimmter Grundflächen .....	37
4.3.	Standardmodulstruktur .....	38
4.3.1.	Standardmodule Baugrube.....	39
4.3.2.	Standardmodule Rohbau und Gebäudehülle .....	41
4.3.3.	Standardmodule des nicht-technischen Ausbaus .....	56
4.3.4.	Alternativmodule .....	61

4.4.	Verknüpfung des Modells mit Kennwerten .....	69
4.4.1.	Nutzungsdauern von Bauteilen .....	69
4.4.2.	Baupreise .....	70
4.4.3.	Ökobilanzwerte zur grauen Energie und zu fossilen Treibhausgasemissionen .....	71
4.4.4.	Bepreisung fossiler Treibhausgasemissionen .....	74
5.	Ergebnis .....	75
5.1.	Modulstruktur Wohngebäude .....	75
5.2.	Anwendungsmethodik des Modells .....	77
5.3.	Anwendung des Modells .....	80
5.4.	Berechnungsergebnisse .....	82
5.4.1.	Berechnung der grauen Energie .....	82
5.4.2.	Berechnung der fossilen Treibhausgasemissionen .....	85
5.4.3.	Berechnung der Lebenszykluskosten .....	87
5.4.4.	Berechnung der CO <sub>2</sub> -Steuern .....	93
5.4.5.	Berechnung eines alternativen CO <sub>2</sub> -Preises .....	96
5.5.	Validierung des Modells .....	97
5.5.1.	Abgleich des Standards des Modells und Anwendungsbeispiels .....	97
5.5.2.	Vergleich der Herstellungskosten des Modells mit Realbeispiel .....	98
6.	Schlussbemerkungen .....	100
6.1.	Fazit .....	100
6.1.1.	Graue Energie .....	101
6.1.2.	Fossile Treibhausgasemissionen .....	101
6.1.3.	Lebenszykluskosten .....	102
6.1.4.	CO <sub>2</sub> -Steuer .....	104
6.2.	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf .....	105
7.	Literaturverzeichnis .....	106
8.	Abbildungsverzeichnis .....	110
9.	Tabellenverzeichnis .....	112
10.	Formelverzeichnis .....	113
	Anhang A .....	114
	Anhang B .....	138
	Anhang C .....	141



## Abkürzungsverzeichnis

BauGB.....	Baugesetzbuch
BBSR.....	Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, Raumforschung
BNB.....	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BSH.....	Brettschichtholz
BSP.....	Brettsperrholz
DGNB.....	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
EPD.....	Environmental Product Declaration
GEG.....	Gebäudeenergiegesetz
GWP.....	Global Warming Potential
HOAI.....	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
IPCC.....	Intergovernmental Panel on Climate Change
KG.....	Kostengruppe
KVH.....	Konstruktionsvollholz
LBO.....	Landesbauordnung
LCA.....	Life Cycle Assessment
LCC.....	Life Cycle Costing
LPH.....	Leistungsphase
MBO.....	Musterbauordnung
PENRE.....	Primary Energy Non-Renewable Energy Resources
PENRM.....	Primary Energy Non-Renewable Material
PENRT.....	Primary Energy Non-Renewable Total
PERE.....	Primary Energy Renewable Energy Resources
PERM.....	Primary Energy Renewable Material
PERT.....	Primary Energy Renewable Total
PET.....	Primary Energy Total
SIA.....	Schweizer Ingenieur- und Architektenverein
WDVS.....	Wärmedämmverbundsystem, Wärmedämmverbundsystem
WU-Beton.....	Wasserundurchlässiger Beton

# 1. Einleitung

## 1.1. Problemstellung

Die Folgen des Klimawandels sind bereits deutlich zu spüren. Extremwetterereignisse wie Starkregen und Hitzewellen nehmen auch in Deutschland zu. Die Versicherungsschäden erreichten zuletzt Rekordwerte. Seit 1980 sind Schäden durch wetterbedingte Naturkatastrophen in Höhe von 4.238 Milliarden US\$ bei Versicherungen registriert worden (Munich Re, 2022).

Um der weiteren Erderwärmung entgegenzuwirken, ist eine der Hauptmaßnahmen, den Ausstoß von Treibhausgasemissionen wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) oder Methan (CH<sub>4</sub>) zu verringern. Insbesondere der Bausektor verbraucht signifikante Mengen an Energie und Ressourcen, wodurch hohe Mengen an Treibhausgasen emittiert werden. Ca. 35 % des globalen Energieverbrauchs und ca. 38 % der weltweiten Treibhausgasemissionen beruhen auf den Aktivitäten des Bauwesens. Von den 38 % sind ca. 28 % auf den Gebäudebetrieb und 10 % auf die Produktion, den Transport sowie die Nutzung von Baustoffen zurückzuführen. (International Energy Agency (IEA), 2020)

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), oder auch Weltklimarat genannt, hat Anfang August 2021 den ersten Teil des sechsten Sachstandberichts veröffentlicht. In diesem prognostiziert das IPCC, dass die durchschnittliche Temperatur der Atmosphäre im Jahr 2030 um 1,5 °C wärmer als im vorindustriellen Zeitalter (1850-1900) sein wird. Im vorherigen Sachstandbericht von 2014/2015 wurde dieser Temperaturanstieg noch für 2040 prognostiziert. Die Korrektur um zehn Jahre früher, begründet der Weltklimarat damit, dass die Maßnahmen der Staaten gegen die weitere Erderwärmung nicht ausreichen bzw. nicht effektiv genug sind. Das im Übereinkommen von Paris verabschiedete Klimaschutzziel, die Erderwärmung bis 2050 auf 1,5 °C zu begrenzen, wird aus Sicht des Weltklimarates immer unwahrscheinlicher. (IPCC, 2021)

Aufgrund des Beschlusses des Bundesverfassungsgerichts vom 24. März 2021, dass das Bundes-Klimaschutzgesetz in Teilen verfassungswidrig ist, musste die deutsche Bundesregierung das Gesetz anpassen, um dem Klimaschutzabkommen von Paris gerecht zu werden. Folglich wurde das Ziel der Klimaneutralität von 2050 auf 2045 vorgezogen (Bundesverfassungsgericht, 2021; Deutscher Bundestag, 2021)

**Einleitung**

Damit der Übergang zu einer post-fossilen Zukunft bis 2045 erreicht werden kann, müssen der Verbrauch von grauer Energie, also die Energie auf Basis fossiler Ressourcen, und die fossilen Treibhausgasemissionen möglichst schnell auf null gesenkt werden.

Das Bauwesen kann einen großen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten. Bisherige Anstrengungen, die Energieeffizienz zu erhöhen, wie beispielsweise das Gebäudeenergiegesetz (GEG, beschränken sich überwiegend auf die Nutzungsphase von Gebäuden. In Abbildung 1 wird deutlich, dass bei einem Mehrfamilienhaus gemäß der nicht mehr gültigen Energieeinsparverordnung von 2009 25 % der Energieverbräuche bei der Herstellung des Gebäudes entstehen. Bei Gebäuden, die den neuen Standards des GEG entsprechen, ist dieser Anteil mit 47 % sogar deutlich höher. Die Veränderung des Verhältnisses zeigt auf, dass die Berücksichtigung der Energieverbräuche in der Herstellungsphase notwendig wird. Daraus geht ebenfalls hervor, dass auch die Phase nach der Nutzung eines Gebäudes zu berücksichtigen ist.

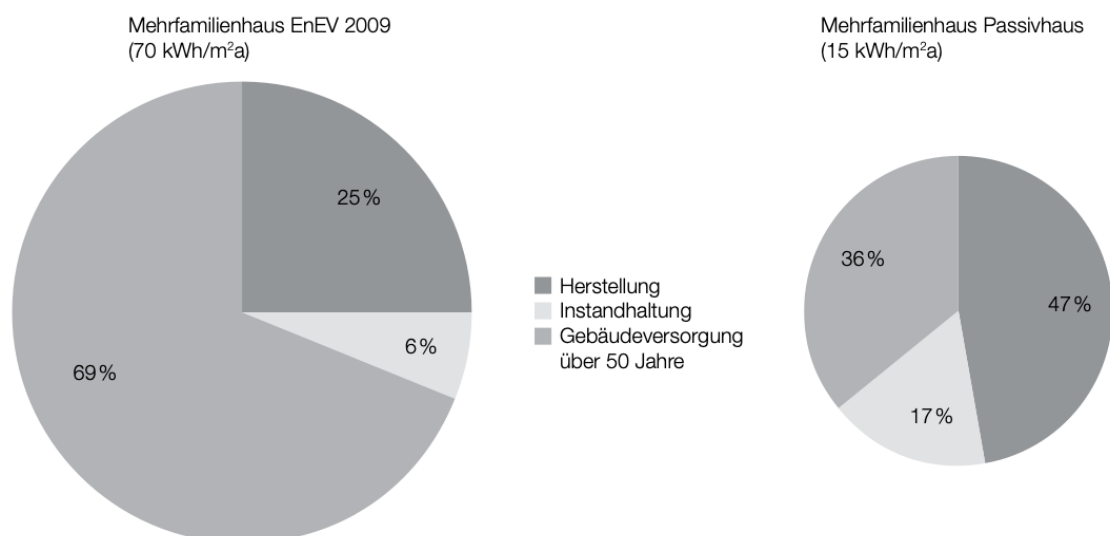


Abbildung 1 Vergleich von Mehrfamilienhäusern mit unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards gegliedert nach Herstellungs- und Nutzungsphase, (Kaufmann et al., 2017, S. 27)

Erst eine ganzheitliche Betrachtung der Energie- und Ressourcenverbräuche über den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden sorgt für die notwendige Transparenz, um darauf basierend Entscheidungen treffen zu können, die dem Klimaschutz dienen.

Als ein Instrument zur Erreichung der Klimaneutralität hat die deutsche Bundesregierung zu Beginn des Jahres 2021 eine CO<sub>2</sub>-Steuer auf fossile Endenergie erlassen (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2019). Des Einsatzes dieses Instrumentes bedienen sich immer mehr Nationen, um die Treibhausgasemissionen zu

senken (The World Bank, 2021). So kann davon ausgegangen werden, dass die Baukosten, u. a. aufgrund einer CO<sub>2</sub>-Besteuerung, zukünftig steigen werden und es zu Kostenverschiebungen bei den Bauweisen kommen wird (Hillebrandt, 2018, S. 14). Daraus resultiert die Notwendigkeit, bei Investitionsentscheidungen zukünftig vermehrt sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte zu berücksichtigen.

## 1.2. Zielsetzungen und Hypothese der Arbeit

Für die Arbeit werden drei Zielsetzungen festgelegt:

Erstes Ziel ist die Ermittlung der Kosten, des Verbrauchs von grauer Energie und der fossilen Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus von Baukonstruktionen des Wohnbaus.

Das zweite Ziel der Arbeit ist es aufzuzeigen, welche Auswirkungen alternative Bauweisen, wie die Holzbauweise, auf den Verbrauch von grauer Energie, die fossilen Treibhausgasemissionen sowie die Lebenszykluskosten einer Baukonstruktion haben.

Als letztes Ziel verfolgt die Arbeit, zu analysieren, welche Auswirkungen eine CO<sub>2</sub>-Steuer auf fossile Treibhausgasemissionen auf die Lebenszykluskosten erzeugen würde, die weltweit in gleicher Weise erhoben werden würde.

Aus den zuvor definierten Zielsetzungen leitet sich folgende Hypothese ab:

***„Je mehr Bauteile der Baukonstruktion von Wohngebäuden durch Holzbauteile ersetzt werden, desto geringer werden, unter der Annahme einer weltweiten CO<sub>2</sub>-Steuer, die Lebenszykluskosten, die Verbräuche von grauer Energie sowie die fossilen Treibhausgasemissionen.“***

### 1.3. Aufbau der Arbeit

Zu Beginn werden in Kapitel 2 der theoretische Hintergrund sowie die Grundlagen erläutert, die zur Erreichung der zuvor beschriebenen Zielsetzungen und Beantwortung der Hypothese der Arbeit notwendig sind. Darauf folgt in Kapitel 3 die Beschreibung der angewendeten Methodik. In Kapitel 4 wird anschließend auf die Modellentwicklung eingegangen. Im darauffolgenden Kapitel 5 sind die Ergebnisse der Modellanwendung anhand eines Realbeispiels dargestellt. Zusätzlich werden mit dem Realbeispiel die vom Modell ermittelten Herstellungskosten und die getroffenen Annahmen der Bauweise verifiziert. Das Kapitel 6 bildet den Abschluss der Arbeit in dem zum einen das Fazit und zum anderen ein Ausblick des weiteren Forschungsbedarfs gegeben wird.

## 2. Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel zum theoretischen Hintergrund werden die grundlegenden Theorien einer ganzheitlichen ökologischen und ökonomischen Planung von Bauwerken beschrieben, die zur Erreichung der Zielsetzungen und der Einordnung der Hypothese der Arbeit notwendig sind.

Nach Hort (2018, S. 8.99-98.100) ist bei einer ganzheitlichen Planung eines Bauwerks der gesamte Lebenszyklus heranzuziehen. Der gesamte Lebenszyklus umfasst die Phasen der Initiierung/Idee, der Planung, der Realisierung, der Nutzung und der Stilllegung sowie des Abrisses. Im Umfang eines Bauwerks befinden sich das Grundstück, die baulichen Anlagen bzw. die Baukonstruktion und die Gebäudetechnik (Hort, 2018, S. 8.100).

### 2.1. Ganzheitliche Betrachtung ökologischer Aspekte von Bauwerken

#### 2.1.1. Ökobilanzierung

Die ökologische Analyse von Bauwerken erfolgt nach dem normativen Verfahren der Ökobilanzierung (en: Life Cycle Assessment). Die Durchführung einer systematischen Ökobilanz dient der Bewertung von ökologischen Aspekten und ist häufig eine Voraussetzung von Gebäudenachhaltigkeitszertifizierungen, wie die von der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) oder die nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) vom Bundesbauministerium. (BBSR, 2020; DGNB GmbH, 2022; König et al., 2012, S. 48)

Die Vorgehensweise ist in den Normen DIN EN ISO 14040:2021-02 und DIN EN ISO 14044:2021-02 festgelegt. Eine Ökobilanzierung läuft in vier iterativen Schritten ab (DIN e.V., 2021a, S. 16):

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung

- Auswertung

Das primäre Ziel von Ökobilanzen ist die systematische Analyse und Bewertung der potenziellen Umweltwirkungen von Produkten und Dienstleistungen. Dabei wird ein ganzheitlicher Ansatz durch Berücksichtigung aller Phasen des Lebenszyklus, im Kontext einer Ökobilanz auch Lebenswegphasen bezeichnet, verfolgt. (DIN e.V., 2021a, S. 15-16)

Den Lebensweg definiert die DIN EN ISO 14040:2021-02 als *„aufeinander folgende und miteinander verbundene Stufen von der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur endgültigen Beseitigung“* (DIN e.V., 2021a, S. 9).

#### **2.1.1.1 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen**

Bei der Definition des Ziels von Ökobilanzen ist zunächst der Beweggrund und die adressierte Zielgruppe festzulegen. Genauso ist zu Beginn festzuhalten, inwieweit die Ökobilanz veröffentlicht werden soll. Der Untersuchungsrahmen bestimmt den Umfang einer Ökobilanz. Die Eingrenzung des Untersuchungsrahmens erfolgt nach bestimmten Gesichtspunkten. (DIN e.V., 2021a, S. 20-22)

Als erstes ist das zu untersuchende Produktsystem und seine Funktionen zu beschreiben. Weiter ist eine funktionelle Einheit zu definieren, um die Vergleichbarkeit mit anderen Ökobilanzen zu ermöglichen. Darum kann die funktionelle Einheit auch als Vergleichseinheit bezeichnet werden. (DIN e.V., 2021a, S. 15)

Weiter ist die Systemgrenze des Produktsystems zu setzen. Diese ist entscheidend für die Beurteilung, ob ein Input bzw. Output zu einem Produktsystem gerechnet wird. Die Systemgrenze wird u. a. durch die Angabe der berücksichtigten Lebenswegabschnitte festgelegt. (DIN e.V., 2021a, S. 21-22)

Für Input- bzw. Outputströme, die nicht klar einem Produktsystem zuzuordnen sind, ist das Allokationsverfahren zu beschreiben. Dadurch soll dargestellt werden, nach welchen Regeln eine Aufteilung stattfindet. (DIN e.V., 2021a, S. 23)

Als nächstes sind die für die Studie relevanten Wirkungskategorien, der Wirkungskategorie-Indikatoren, auch Umweltwirkindikatoren oder Wirkungsindikator genannt, und das Charakterisierungsmodell zu benennen. Wirkungskategorien repräsentieren wichtige Umwelthemen wie z. B. Ressourcenverbräuche oder auch Emissionen, die einen

#### **Theoretischer Hintergrund**

potenziellen Einfluss auf die Umwelt haben. Die Wirkungsindikatoren sind die quantifizierbaren Darstellungen der Wirkungskategorien. (DIN e.V., 2021b, S. 29-32)

Ferner ist die Methode der Wirkungsabschätzung darzustellen. Dabei geht es darum zu beschreiben, wie die Ergebnisse der Sachbilanz, also die Dokumentation der In- und Outputströme eines Produktsystems, den Wirkungskategorien zugeordnet werden. (DIN e.V., 2021b, S. 28-29)

Des Weiteren ist bei der Definition des Untersuchungsrahmens festzulegen, welcher Anspruch an die Qualität der Daten gestellt wird. Qualitätsansprüche werden u. a. an die Aktualität der Daten oder den geographischen Erfassungsbereich in dem Daten erhoben wurden gestellt. Außerdem sind die getroffenen Annahmen und Einschränkungen nachvollziehbar darzustellen. (DIN e.V., 2021b, S. 20-21)

Zuletzt ist zu beschreiben, ob und in welcher Art die Ökobilanz einer kritischen Prüfung durch Dritte unterzogen wird sowie die Art und den Aufbau des für die Ökobilanz vorgesehenen Berichts. (DIN e.V., 2021a, S. 27-28)

#### **2.1.1.2 Sachbilanzphase**

In der Phase der Sachbilanzierung einer Ökobilanzstudie gilt es alle Input- und Outputströme eines Produktsystems über dessen gesamten Lebenszyklus zu erfassen und zu dokumentieren. Zuallererst sind die Daten zu dem Produktsystem zu quantifizieren. Auch dazu ist eine bestimmte Abfolge zur systematischen Erfassung der Daten in der DIN EN ISO 14044:2021-02 vorgegeben. (DIN e.V., 2021a, S. 22-23)

Die wesentlichen Schritte sind die Vorbereitung der Datenerhebung durch die Erstellung eines Datenerhebungsblatts sowie die graphische Darstellung der Energie- und Stoffströme durch ein Systemfließbild. Auf dieser Basis erfolgt die Datenerhebung und anschließend die Validierung der Daten. Nach erfolgter Prüfung der Daten werden diese einem bestimmten Prozessmodul des Produktsystems zugeordnet. Ein Prozessmodul ist die kleinste betrachtete Einheit des Systems, für die Input- und Outputströme erfasst werden können. Hierbei ist auch das zuvor definierte Allokationsverfahren anzuwenden, also die Aufteilung von Input- und Outputströmen nach zuvor definierten Regeln. Nach der Zuordnung der Daten auf Prozessmodule erfolgt die weitere Zuordnung auf funktionelle Einheiten (Normierung) und die Datenzusammenfassung. Finalisiert wird die Sachbilanz durch eine Prüfung der Systemgrenzen und ggf. erneuten Durchführung der



zuvor beschriebenen Schritte, sodass die Qualität durch den iterativen Ansatz erhöht wird. (DIN e.V., 2021a, S. 22-23; 2021b, S. 22-27)

### **2.1.1.3 Wirkungsabschätzung**

In der Phase der Wirkungsabschätzung einer Ökobilanz sind die Ergebnisse der Sachbilanz mit Umweltwirkindikatoren zu verknüpfen. Darauf basierend erfolgt die Abschätzung der potenziellen Wirkungen auf die Umwelt. In der Norm wird klargestellt, dass bei einer Ökobilanzierung ausschließlich potenzielle Umweltwirkungen analysiert und keine absoluten und präzisen Aussagen getroffen werden. (DIN e.V., 2021a, S. 18)

Wie bei den vorherigen Schritten auch, ist die Wirkungsabschätzung systematisch aufgebaut. Die DIN EN ISO 14040:2021-02 gibt eine dreistufige Vorgehensweise vor. Zunächst sind die Wirkungskategorien, die Wirkungsindikatoren und die Charakterisierungsmodelle auszuwählen. Die Wirkungskategorie kann als Themenklasse und der Wirkungsindikator als dessen quantifizierbarer Parameter verstanden werden. (DIN e.V., 2021b, S. 29-32)

Die Wirkungskategorien lassen sich unterteilen zum einen in Umweltwirkungen, dazu zählt z. B. die Kategorie globale Erwärmung, und zum anderen in Ressourceneinsatz, zu dem der Verbrauch von Rohstoffen und Energieträgern zählt. Im Bereich des Bauwesens gibt die DIN EN 15804:2020-03 als eine weitere Wirkungskategorie die Kategorie Abfall und Output vor. Hierzu zählen z. B. gefährliche deponierte Abfälle und Stoffe zum Recycling. (DIN e.V., 2020, S. 43-46; 2021a, S. 29-31)

Nach dem ersten Schritt folgt die Zuweisung der Sachbilanzergebnisse zu den Wirkungsindikatoren, auch Klassifizierung genannt. Als letzter Schritt der Wirkungsabschätzung sind die Wirkungsindikatorwerte zu berechnen, auch Charakterisierung genannt. Bei der Charakterisierung werden die Sachbilanzergebnisse mittels eines Charakterisierungsfaktors, der sich aus dem gewählten Charakterisierungsmodell ergibt, in die Einheit des Wirkungsindikators umgerechnet. Beispielsweise werden bei der Berechnung des Treibhauspotenzials die Kohlendioxid-Emissionen aufgrund des niedrigeren Wirkpotenzials mit einem niedrigeren Faktor multipliziert als Methan-Emissionen. (DIN e.V., 2021a, S. 32-33)

Neben den zuvor beschriebenen Schritten der Wirkungsabschätzung, die verbindliche Bestandteile einer Ökobilanzierung sind, gibt es noch optionale Maßnahmen, die durchgeführt werden können. Es kann noch eine Berechnung des Betrages von

#### **Theoretischer Hintergrund**

Wirkungsindikatorwerten im Verhältnis zu einem oder mehreren Referenzwerten erfolgen, auch Normierung genannt. Des Weiteren kann optional eine Ordnung und Gewichtung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung erfolgen. (DIN e.V., 2021b, S. 33-35)

#### **2.1.1.4 Auswertung**

Der letzte Teil einer Ökobilanzierung beschäftigt sich mit der Auswertung der Studie. Innerhalb dessen geht es um die Identifizierung der signifikant herausstechenden Parameter sowie Beurteilung der Ökobilanz durch Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen. Dabei ist ein Bezug auf die zu Beginn der Studie festgelegten Ziele und den Untersuchungsrahmen herzustellen. Zuletzt werden Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen, die optimalerweise spezifisch an Entscheidungsträger adressiert werden, gegeben. (DIN e.V., 2021b, S. 36-40)

#### **2.1.2. Lebenszyklusphasen**

Die DIN EN 15804:2020-03 (DIN e.V., 2020) gliedert den Lebensweg bzw. den Lebenszyklus von Bauwerken in Lebenszyklusphasen auf. Der Lebenszyklus wird in vier übergeordnete Phasen unterteilt. Die übergeordneten Phasen gliedern sich in insgesamt 16 Informationsmodule. (DIN e.V., 2020, S. 20-22) Um keine Verwechslung der Begrifflichkeiten im Rahmen dieser Arbeit zu erzeugen, wird statt des Begriffs der Informationsmodule von Subphasen gesprochen. Weiter werden die Lebenszyklusphasen der Herstellung und des Baus zusammengefasst als Phase A, die Nutzungsphase als Phase B und die Entsorgungsphase als Phase C bezeichnet.

Bei einer Ökobilanzierung gibt es außerdem die Phase D, die explizit separat zu betrachten ist. Diese Phase umfasst die Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen eines Produktsystems bzgl. des Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recycling-Potenzials (End-of-Life-Potenzial). Diese Unterscheidung ist wichtig, weil nicht vorausgesetzt werden kann, dass die Potenziale genutzt werden. (DIN e.V., 2020, S. 32-33)

Übergeordnete Lebenszyklusphasen eines Bauwerks	Informationsmodule (bzw. Subphasen)
Herstellungsphase – Phase A Teil 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A1 – Rohstoffbereitstellung</li> <li>• A2 – Transport</li> <li>• A3 – Herstellung</li> </ul>
Bauphase – Phase A Teil 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A4 – Transport</li> <li>• A5 – Bau-/Einbauprozess</li> </ul>
Nutzungsphase – Phase B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• B1 – Nutzung</li> <li>• B2 – Instandhaltung</li> <li>• B3 – Reparatur</li> <li>• B4 – Ersatz</li> <li>• B5 – Umbau/Erneuerung</li> <li>• B6 – Betrieblicher Energieeinsatz</li> <li>• B7 – Betrieblicher Wassereinsatz</li> </ul>
Entsorgungsphase – Phase C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C1 – Rückbau, Abriss</li> <li>• C2 – Transport</li> <li>• C3 – Abfallbehandlung</li> <li>• C4 – Deponierung</li> </ul>
Ergänzende Informationen außerhalb des Lebenszyklus von Bauwerken (Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze) – Phase D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D – Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recycling-Potenzial (End-of-Life-Potenzial)</li> </ul>

Tabelle 1 Lebenszyklusphasen von Bauwerken nach DIN EN 15804:2020-03, (DIN e. V., 2020b, S. 17)

Die Strukturierung des Lebensweges eines Gebäudes in zeitliche Abschnitte erlaubt eine differenzierte Analyse und bildet die Grundlage für Schlussfolgerungen und Empfehlungen. Durch diese Betrachtungsweise werden Abhängigkeiten der Lebenszyklusphasen zueinander identifiziert. So kann beispielsweise untersucht werden, wie sich eine Änderung der Eingangsparameter auf die einzelnen Lebenszyklusphasen auswirkt. (DIN e.V., 2021b, S. 51).

Die DIN EN 15804:2020-03 (DIN e. V., 2020b, S. 17) gibt mögliche Ausgestaltungsvarianten der Systemgrenzen von Ökobilanzen vor. Dabei wird festgelegt, welche Lebenszyklusphasen einzubinden sind. Folgende Varianten werden angegeben:

- Von der Wiege bis zum Werkstor (Phasen A1-A3) mit den Phasen C1-C4 und D
- Von der Wiege bis zum Werkstor den Phasen C1-C4 und D und jeweils optional die Phasen A4, A5, B1-B7
- Von der Wiege bis zur Bahre und Phase D (en: cradle-to-grave bzw. cradle-to-cradle bei Berücksichtigung der Phase D)
- Von der Wiege bis zum Werkstor (en: cradle-to-gate)

#### Theoretischer Hintergrund

- Von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen (en: cradle-to-gate with options)

### **2.1.3. Umweltdeklarationen**

Es gibt drei Formen von Umweltproduktdeklarationen. Umweltdeklarationen des Typs I sind in der DIN EN ISO 14024:2018-06 geregelt und müssen von unabhängigen Dritten geprüft werden. In diesen Deklarationen werden die umweltbezogenen Vorteile eines Produkts im Branchenvergleich dargestellt. (Rosen, 2018, S. 28)

Umweltdeklarationen des Typs II sind freiwillige Selbsterklärungen von Herstellern und sind in der Norm DIN EN ISO 14021:2021-10 geregelt. Diese werden in kompletter Eigenverantwortung eines Herstellers erstellt und unterstehen somit keiner kritischen Prüfung von Dritten. (Rosen, 2018, S. 28)

Umweltdeklarationen des Typs III nach DIN EN ISO 14025:2011-10 werden als Umweltproduktdeklarationen (en: Environmental Product Declaration (EPD) bezeichnet. Sie sind unabhängig verifizierte, also von Dritten geprüfte, produktspezifische Ökobilanzen, die konform mit den Normen DIN EN ISO 14040:2021-02 und DIN EN ISO 14044:2021-02 sind. Auf Basis von EPDs und generischen Datensätzen zu Bauprozessen werden Ökobilanzen von Bauwerken kumulativ aufgebaut. Also eine Gesamtökobilanz aus Teilökobilanzen. (DIN e.V., 2011, S. 5-6, 36-37; Rosen, 2018, S. 29)

Bei der Erstellung von EPDs für das Bauwesen ist zusätzlich die DIN EN 15804:2020-03 zu beachten. Die DIN EN 15804:2020-03 geben u. a. vor, welche Umweltwirkkategorien bzw. Wirkindikatoren bei Bauprodukt-EPDs anzugeben sind. (DIN e.V., 2020, S. 43-48)

### **2.1.4. Ökobilanzdatenbanken**

In den vergangenen Jahren wurden viele Ökobilanzdatenbanken entwickelt, die Sammlungen von Ökobilanzdatensätze kommerziell oder öffentlich bereitstellen. Anbieter von Ökobilanzdatenbanken sind u. a. die kommerzielle Datenbank GaBi, was für ganzheitliches Bilanzieren steht, die Datenbank ecoinvent, welche zusammen mit der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich entwickelt wurde und ProBas, was für prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme steht, vom deutschen Umweltbundesamt. (ecoinvent, 2022; Frischknecht, 2020, S. 184-186; Umweltbundesamt, 2022)

Die von der Firma Sphera kommerziell betriebene Datenbank GaBi ist nach eigenen Aussagen mit 15.000 Sachbilanzdatensätzen die größte Ökobilanzdatenbank. Die Datenbank enthält Daten für unterschiedliche Sektoren zu Materialien, Energie, Herstellungs- und Transportprozessen aller Lebensphasen, die jährlich aktualisiert werden. Außerdem sind die Datensätze mit der Norm DIN EN ISO konform. (Sphera Solutions GmbH, 2022)

#### **2.1.4.1 ÖKOBAUDAT**

Die ÖKOBAUDAT ist eine Datenbank mit EPDs von Bauprodukten zur spezifischen Ökobilanzierung im Bauwesen. Die Datensätze der ÖKOBAUDAT beruhen hauptsächlich auf der Datenbank GaBi und wird vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat bereitgestellt. Alle Daten sind DIN EN 15804 konform und verbindliche Grundlage für Bewertungssysteme, wie z. B. dem BNB oder der DGNB. Die Datensätze stehen kostenfrei zur Verfügung und werden mindestens einmal jährlich aktualisiert. Die aktuelle Version der ÖKOBAUDAT 2021-II ist vom 25.06.2021. (BBSR, 2021a; König et al., 2012, S. 57)

Die Datensätze der ÖKOBAUDAT werden in folgende Kategorien gegliedert (BBSR, 2021b):

- Mineralische Baustoffe
- Dämmstoffe
- Holzprodukte
- Metalle
- Beschichtungen
- Kunststoffe
- Komponenten von Fenstern, Türen und Vorhangfassaden
- Haustechnik und Sanitär
- Baustellenprozesse, Transporte, Energieträger und Abfallbehandlung

Weiter wird bei der Qualität der Datensätze zwischen fünf Datensatztypen unterschieden (BBSR, 2021c, S. 12):

- (Hersteller)-Spezifischer Datensatz für ein konkretes Produkt
- Durchschnittlicher Datensatz, welcher auf Grundlage von mehreren verschiedenen Unternehmensdaten gemittelt wurde
- Repräsentativer Datensatz, der repräsentativ für ein Land oder eine Region ist
- Generischer Datensatz, der entweder gemäß DIN EN 15804:2020-03 oder auf Basis von Daten, die nicht von Unternehmen stammen wie z. B. von Expertengruppen, erstellt wurden.
- Unspezifischer Datensatz für spezifische Produkte, die auf Basis einer Muster-EPD erstellt wurden

#### **2.1.5. Graue Energie**

Die Fachsprache des Bauwesens ist bei der Definition der grauen Energie nicht eindeutig. Püschel und Teller (2013) definieren die graue Energie, als die „Energienmenge, die für Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung eines Produktes oder einer Dienstleistung notwendig ist“. Also der kumulierte Energieverbrauch über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer Dienstleistung. Der Schweizer Ingenieur- und Architektenverein (SIA) präzisiert in seinem Normenwerk SIA 2032 die Definition, indem die Energiequelle berücksichtigt wird. Gemäß des Merkblatt SIA 2032 ist die graue Energie gleich die *„gesamte Menge nicht erneuerbarer Primärenergie, die für alle vorgelagerten Prozesse, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse und für die Entsorgung, inkl. der dazu notwendigen Transporte und Hilfsmittel, erforderlich ist. Sie wird auch als kumulierter, nicht erneuerbarer Energieaufwand bezeichnet“* (Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, 2010).

Die graue Energie ist ein Umweltindikator bzw. Parameter, welcher zu der Umweltwirkungskategorie des Ressourcenverbrauchs gezählt wird und in der Einheit MJ angegeben wird (DIN e.V., 2020). In der europäisch harmonisierten Normung findet die Unterscheidung zwischen den Energieträgerquellen z. B. bei der Analyse des Ressourceneinsatzes in Umweltproduktdeklarationen von Bauprodukten gemäß DIN EN 15804 statt. In dieser Norm wird zum einen zwischen erneuerbaren und nicht-erneuerbaren

#### **Theoretischer Hintergrund**

Primärenergien und zum anderen zwischen stofflicher und energetischer Nutzung der Rohstoffe unterschieden. In der Tabelle 1 ist die Gliederung des Primärenergieeinsatzes im Sinne der DIN EN 15804 dargestellt. (DIN e. V., 2020b)

Obergegriff	Englische Bezeichnung (Abkürzung)	Erste Untergliederung	Englische Bezeichnung (Abkürzung)	Zweite Untergliederung	Englische Bezeichnung (Abkürzung)
Gesamteinsatz Primärenergie	Primary Energy Total (PET)	Einsatz nicht-erneuerbarer Primärenergie	Primary Energy Non-Renewable Total (PENRT)	Stoffliche Nutzung	Primary Energy Non-Renewable Material (PENRM)
				Energetische Nutzung	Primary Energy Non-Renewable Energy Resources (PENRE)
		Einsatz erneuerbarer Primärenergie	Primary Energy Renewable Total (PERT)	Stoffliche Nutzung	Primary Energy Renewable Material (PERM)
				Energetische Nutzung	Primary Energy Renewable Energy Resources (PERE)

Tabelle 2 Begriffe zur Beschreibung des Verbrauchs von Primärenergie entsprechend EN 15804:2012+A2:2019, (DIN e.V., 2020, S. 46)

### 2.1.6. Treibhauspotenzial fossiler Energieträger und Stoffen

Im Zuge des natürlichen Treibhauseffektes tritt kurzweilige Sonnenstrahlung in die Atmosphäre der Erde ein, bis die Strahlung von der Erdoberfläche teilweise absorbiert und teilweise als langwellige Infrarotstrahlung reflektiert wird. Die sogenannten Treibhausgase wie u. a. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) oder Methan (CH<sub>4</sub>) haben den Effekt, die reflektierte Infrarotstrahlung innerhalb der Troposphäre (unterer Teil der Atmosphäre) zu absorbieren und richtungsunabhängig wieder abzustrahlen. Je höher die Konzentration dieser Gase desto höher der Treibhauseffekt. Die Treibhausgase kommen in natürlicher Weise in der Atmosphäre vor. Daneben gibt es noch die anthropogenen Treibhausgase, die im Zeitalter des Menschen in nicht natürlicher Weise in die Atmosphäre gelangt sind. So gelten beispielweise Emissionen, die auf fossilen Ressourcen beruhen, als anthropogene Treibhausgase. (König et al., 2012, S. 45; Umweltbundesamt, 2021a)

#### Theoretischer Hintergrund

In Folge der Überarbeitung der DIN EN 15804-2020-03 ist das Treibhauspotenzial (en: Global Warming Potential auf Basis fossiler Energieträger und Stoffe als ein verpflichtender Kernindikator zur Abschätzung der Umweltwirkungen separat in Bauprodukt-EPDs auszuweisen. Es zählt zu der Umweltkategorie Klimawandel-fossil und wird in der Einheit kg-CO<sub>2</sub>-Äq. angegeben. Neben dem fossilen Treibhauspotenzial sieht die DIN EN 15804-2020-03 auch die separate Angabe der Indikatoren des biogenen Treibhauspotenzials sowie des Treibhauspotenzials, welches im Zusammenhang mit Landnutzungen entsteht, vor. (DIN e. V., 2020b)

### **2.1.7. Relevanz von grauer Energie und fossilen Treibhausgasemissionen bei Gebäuden**

Die Relevanz der Betrachtung von grauer Energie wird im Bauwesen stetig wichtiger. Im Vorschlag der Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden der Europäische Kommission (2021, S. 19 - 20) werden die Ziele ausgesprochen, den Energieverbrauch auf Basis von fossilen Energieträgern und die Treibhausgasemissionen von Gebäuden über deren gesamten Lebenszyklus zu reduzieren.

Weiter ist vorgesehen, dass ab 2030 bei allen Neubauten die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus verpflichtend zu ermitteln und zu dokumentieren ist. Neubauten mit einer Nutzfläche von mehr als 2000 Quadratmeter sind bereits ab 2027 dazu verpflichtet. (Europäische Kommission, 2021, S. 13)

## **2.2. Ganzheitliche Betrachtung ökonomischer Aspekte von Bauwerken**

### **2.2.1. Kostenplanung**

Nach Tripler (2018, S. 8.51) erfordert die Investition in ein Bauwerk eine systematische Planung und Erfassung der Kosten, damit Investierenden der finanzielle Aufwand vor einer Investitionstätigkeit nachvollziehbar aufgezeigt werden kann. Tripler (2018, S. 8.51) gibt an, dass *„Entscheidungen über Bauweise, Bauvolumen, Standard und Bauzeit sowie über die Frage, ob überhaupt gebaut werden soll, hängen wesentlich von Stand und Ergebnis der Kostenplanung ab“*.

Die Art und der Genauigkeitsgrad der Kostenermittlung ist vom Stand der Planung abhängig. Der Stand der Planung gliedert sich im Bauwesen nach den neun Leistungsphasen (LPH) der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI). Die Tabelle **Theoretischer Hintergrund**



3 zeigt die Arten der Kostenermittlungen mit den dazugehörigen Genauigkeitsgraden auf sowie zu welchem Stand der Planung die jeweilige Kostenermittlungsart durchgeführt wird.

Art der Kostenermittlung	Grad der Genauigkeit	Stand der Planung bzw. LPH nach HOAI
Kostenrahmen	Nicht definiert	Bedarfsplanung (vor der LPH 1)
Kostenschätzung	+/- 30 %	Vorplanung (LPH 2)
Kostenberechnung	+/- 20 %	Entwurfsplanung (LPH 3)
Kostenanschlag	+/- 10 %	Ausführungsplanung (LPH 5)
Kostenfeststellung	0 % (Ist-Kosten)	Objektüberwachung (LPH 8)

Tabelle 3 Übersicht der Kostenermittlungsarten und -genauigkeiten in den Planungsphasen, eigene Darstellung nach Tripler (2018, S. 8.52), König et al. (2012, S. 67) und Scholz (2019, S. 71)

Im Bauwesen wird zur Strukturierung der Kosten die DIN 276:2018-12 als Grundlage verwendet. (Tripler, 2018, S. 8.51)

Die Kostenstruktur nach DIN 276:2018-12 gliedert die Kosten, die im Zusammenhang mit einem Bauwerk des Hochbaus stehen, in acht Kostengruppen (KG) (DIN e.V., 2018, S. 13):

- KG 100 Grundstück
- KG 200 Vorbereitende Maßnahmen
- KG 300 Bauwerk – Baukonstruktion
- KG 400 Bauwerk – Technische Anlagen
- KG 500 Außenanlagen und Freiflächen
- KG 600 Ausstattung und Kunstwerke
- KG 700 Baunebenkosten
- KG 800 Finanzierung

Gemäß der Norm zählen zu der Baukonstruktion (KG 300) alle „Bauleistungen und Lieferungen zur Herstellung des Bauwerks von Hochbauten, Ingenieurbauten und Infrastrukturanlagen, jedoch ohne die technischen Anlagen (KG 400)“ (DIN e.V., 2018, S. 17).

Die übergeordneten KG (1. Gliederungsebene) untergliedern sich in zwei weitere Ebenen. Für die Baukonstruktion sind in der Tabelle 4 alle Untergliederungsebenen dargestellt.

2. Ebene der KG 300	3. Ebene der KG 300
310 Baugrube/Erdbau	311 Herstellung 312 Umschließung 313 Wasserhaltung 314 Vortrieb 319 Sonstiges zur KG 310
320 Gründung, Unterbau	321 Baugrundverbesserung 322 Flachgründungen und Bodenplatte 323 Tiefgründungen 324 Gründungsbeläge 325 Abdichtungen und Bekleidungen 326 Dränagen 329 Sonstiges zur KG 320
330 Außenwände/Vertikale Baukonstruktionen, außen	331 Tragende Außenwände 332 Nichttragende Außenwände 333 Außenstützen 334 Außenwandöffnungen 335 Außenwandbekleidungen, außen 336 Außenwandbekleidungen, innen 337 Elementierte Außenwandkonstruktionen 338 Lichtschutz zur KG 330 339 Sonstiges zur KG 330
340 Innenwände/Vertikale Baukonstruktionen, innen	341 Tragende Innenwände 342 Nichttragende Innenwände 343 Innenstützen 344 Innenwandöffnungen 345 Innenwandbekleidungen 346 Elementierte Innenwandkonstruktionen 347 Lichtschutz zur KG 340 349 Sonstiges zur KG 340
350 Decken/Horizontale Baukonstruktionen	351 Deckenkonstruktion 352 Deckenöffnungen 353 Deckenbeläge 354 Deckenbekleidungen 355 Elementierte Deckenkonstruktionen 359 Sonstiges zur KG 350

360 Dächer	361 Dachkonstruktionen 362 Dachöffnungen 363 Dachbeläge 364 Dachbekleidungen 365 Elementierte Dachkonstruktionen 366 Lichtschutz zur KG 360 369 Sonstiges zur KG 360
370 Infrastrukturanlagen	371 Anlagen für den Straßenverkehr 372 Anlagen für den Schienenverkehr 373 Anlagen für den Flugverkehr 374 Anlagen des Wasserbaus 375 Anlagen der Abwasserentsorgung 376 Anlagen der Wasserversorgung 377 Anlagen der Energie- und Informationsversorgung 378 Anlagen der Abfallentsorgung 379 Sonstiges zur KG 370
380 Baukonstruktive Einbauten	381 Allgemeine Einbauten 382 Besondere Einbauten 383 Landschaftsgestalterische Einbauten 384 Mechanische Einbauten 385 Einbauten in Konstruktionen des Ingenieurbaus 386 Orientierungs- und Informationssysteme 387 Schutzeinbauten 389 Sonstiges zur KG 380
390 Sonstige Maßnahmen für Baukonstruktionen	391 Baustelleneinrichtung 392 Gerüste 393 Sicherungsmaßnahmen 394 Abbruchmaßnahmen 395 Instandsetzungen 396 Materialentsorgung 397 Zusätzliche Maßnahmen 398 Provisorische Baukonstruktionen 399 Sonstiges zur KG 390

Tabelle 4 Zweite und dritte Gliederungsebenen der KG 300 gemäß DIN 276:2018-12, (DIN e.V., 2018, S. 17-23)

Gegenstand dieser Arbeit ist ausschließlich die Baukonstruktion eines Bauwerks (KG 300) ohne technische Anlagen (KG 400), wie es die DIN 276:2018-12 auffasst. Außerdem werden die KG 370 (Infrastrukturanlagen) und 380 (baukonstruktive Einbauten) im Zuge der weiteren Bearbeitung dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Die Berücksichtigung dieser KG im Rahmen der Modellentwicklung ist aus Sicht des Autos kein wesentlicher Teil der Baukonstruktion bzw. bezieht sich auf Besonderheiten von Baukonstruktionen, die in einem generischen Modell nur bedingt abgebildet werden können und deshalb zur Vereinfachung des Modells nicht berücksichtigt werden.

### **2.2.2. Lebenszykluskostenrechnung**

Ganzheitliche Bewertungen von ökonomischen Aspekten wie die Kosten eines Bauwerks finden in Form von Lebenszykluskostenrechnungen (en: Life Cycle Costing (LCC)) statt (König et al., 2012, S. 58).

Die ISO 15686-5:2017(E) unterscheidet bei Lebenszykluskosten, wie in Abbildung 2 zu sehen, zwischen Lebenszykluskosten im weiteren Sinn (en: Whole Life Cost) und im engeren Sinn (en: Life Cycle Cost). Bestandteile von Lebenszykluskosten im engeren Sinn, wie sie im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt werden, gemäß ISO (2017, S. 6-9) sind

- die Erstinvestitionskosten, also die Herstellungskosten eines Bauwerks,
- die Nutzungskosten aus Betriebskosten und Kosten für Reinigung, Pflege und Instandhaltung, also alle Kosten, die während der Nutzungsdauer durch den Betrieb eines Bauwerks entstehen,
- die Kosten für Rückbau und Entsorgung bzw. sonstige End-of-Life-Szenarien sowie
- die umweltbezogenen Kosten, wie beispielsweise Kosten durch eine CO<sub>2</sub>-Steuer, die in allen Phasen auftreten können.

Mit End-of-Life-Szenarien sind verschiedene Formen des Recyclings gemeint (Hillebrandt & Seggewies, 2018, S. 59):

- Wiederverwendung unter Erhalt der Produktgestalt bei gleichbleibender Qualität
- Weiterverwendung unter Erhalt der Produktgestalt mit Qualitätseinbußen
- Wiederverwertung unter Auflösung der Produktgestalt bei gleichbleibender Qualität
- Weiterverwertung unter Auflösung der Produktgestalt mit Qualitätseinbußen

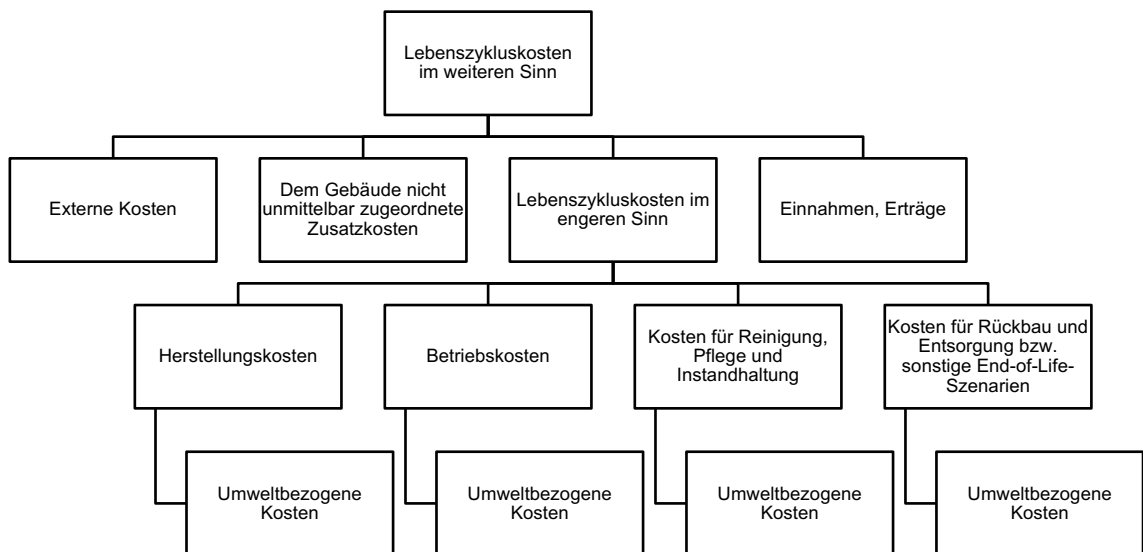


Abbildung 2 Lebenszykluskosten im weiteren Sinn gemäß ISO 15686-5:2017(E), eigene Darstellung nach ISO (2017, S. 7) und König et al. (2012, S. 60)

Der Zweck einer LCC ist die Bewertung der „kostenseitig oder wirtschaftlich langfristig vorteilhaftesten Variante“ (König et al., 2012, S. 58) eines ganzen Gebäudes oder von bestimmten Teilen des Bauwerks. Angewendet kann die LCC zu verschiedenen Zeitpunkten der Planung, aber auch während der Betriebsphase, wenn Umbau- und Modernisierungsmaßnahmen geplant werden. (König et al., 2012, S. 58)

### 2.2.2.1 Bau-/Herstellungskosten

Die Herstellungskosten eines Bauwerks werden in frühen Planungsphasen über Kostenkennwerte und bestimmter Parameter des geplanten Gebäudes ermittelt. Kostenkennwerte werden in der Praxis aus Veröffentlichungen und Tabellenwerken, wie der Baupreisindex vom Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (BKI) oder die im Internet verfügbare Baupreisdatenbank Baupreislexikon vom Anbieter f:data GmbH, herangezogen. Zur Bestimmung der geplanten Herstellungskosten werden die Kostenkennwerte mit geometrischen oder nutzungsabhängigen Bezugsgrößen multipliziert. Eine geometrische Bezugsgröße ist beispielsweise die Summe der Geschossflächen, daneben ist eine nutzungsbedingte Bezugsgröße beispielsweise die Anzahl von Büroarbeitsplätzen. (Kornblum, 2018, S. 20-22)

### 2.2.2.2 Nutzungskosten

Wie zuvor beschrieben, setzen sich die Nutzungskosten aus den Betriebskosten und den Kosten für Reinigung, Pflege und Instandhaltung, die in der Nutzungsphase

**Theoretischer Hintergrund**

anfallen, zusammen (ISO, 2017, S. 6-9). Ähnlich wie bei den Herstellungskosten gibt es eine normative Gliederungsstruktur der Nutzungskosten. Die DIN 18960:2020-11 führt folgende Nutzungskostengruppen auf (DIN e. V., 2020a):

- 310 Versorgung
- 320 Entsorgung
- 330 Reinigung und Pflege von Gebäuden
- 350 Bedienung, Inspektion und Wartung
- 410 Instandsetzung der Baukonstruktionen
- 420 Instandsetzung der Technischen Anlagen

Für die Berechnung der Nutzungskosten, als Teil der LCC, ist hinsichtlich der Baukonstruktion eines Bauwerks die Ermittlung der Instandhaltungskosten aus KG 350 bzw. der Teil der Wartung der KG 350 und KG 410 von Bedeutung. Kosten für Ver- und Entsorgung, wie z. B. die Deckung des Energie- oder Trinkwasserbedarfs sowie Kosten für Reinigungen stehen in keinem direkten Zusammenhang mit der Baukonstruktion und werden deshalb bei der Modellentwicklung in dieser Arbeit nicht vorgesehen. Gleiches gilt für die KG 420.

Die DIN 31051:2019-06 definiert die Instandhaltung eines Gebäudes als *„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objekts, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass es die geforderte Funktion erfüllen kann“* (DIN e. V., 2019, S. 4). Zur Instandhaltung eines Objekts zählt die DIN 31051:2019-06 vier Maßnahmen. Die Wartung ist eine Maßnahme *„zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats“* (DIN e. V., 2019, S. 5). Daneben gibt es die Inspektion als Maßnahme zur *„Prüfung auf Konformität der maßgeblichen Merkmale eines Objekts, durch Messung, Beobachtung oder Funktionsprüfung“* (DIN e. V., 2019, S. 5). Als Drittes wird die Instandsetzung als physische Maßnahme genannt, *„die ausgeführt wird, um die Funktion eines fehlerhaften Objekts wiederherzustellen“* (DIN e. V., 2019, S. 5). Als letzte Instandhaltungsmaßnahme gilt die Verbesserung. Es umfasst *„die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie*

*Maßnahmen des Managements zur Steigerung der immanenten Zuverlässigkeit und/oder Instandhaltbarkeit und/oder Sicherheit eines Objekts, ohne seine ursprüngliche Funktion zu ändern“ (DIN e. V., 2019, S. 5-6).*

Die mit Bauwerken verbundene lange Nutzungsphase bedingt Unsicherheiten bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten. Um eine Vergleichbarkeit der LCC herzustellen, ist es von entscheidender Bedeutung die angewendete Methodik der Nutzungskostenermittlung darzustellen, da unterschiedliche Ansätze verfolgt werden können. Je nach gewählter Instandhaltungsstrategie und Verwendung von Tabellen zur rechnerischen Nutzungsdauer von Bauteilen können die Ergebnisse von Nutzungskostenermittlungen abweichen. (König et al., 2012, S. 59)

Nach Kornblum (2018) besteht ein Gebäude *„aus vielen Bauteilen, deren Lebensdauer sehr unterschiedlich ist. Diese müssen, um die geplante Gesamtnutzungsdauer eines Gebäudes zu erreichen, zum Teil mehrfach instandgesetzt werden“.*

Zur Ermittlung der Instandsetzungskosten gibt es zum einen den überschlägigen und zum anderen den detaillierten Ansatz. Bei der überschlägigen Ermittlung wird ein aus Erfahrungswerten generierter Prozentsatz der Herstellungskosten angesetzt. Bei der detaillierten Ermittlung werden die Kosten der regelmäßigen Instandsetzungen und die Kosten für den Ersatz eines Bauteils nach dessen Erreichen der maximalen Lebensdauer angesetzt. Dazu werden Tabellen mit Bauteillebensdauern, wie die des BNB, herangezogen. (König et al., 2012, S. 69-70)

### **2.2.2.3 Kosten für Abbruch und Verwertung**

Nach der Nutzungsphase wird ein Gebäude abgerissen und die sich daraus ergebenden Stoffströme der Verwertung zugeführt. Zur Ermittlung der Kosten dieser Phase werden nach König et al. (2012, S. 111) *„die Abbruchkosten der gesamten Kubatur und die Entsorgungskosten der Restbaustoffe nach den örtlichen Gegebenheiten“* errechnet.

## 3. Methodik der Arbeit

### 3.1.1. Definition eines Standards

Als erster Schritt wird ein generischer Standard von Baukonstruktionen des Wohnungsbaus definiert, der darauffolgend als Basis für die Modellentwicklung dienen soll.

Bei der Definition des Standards werden grundsätzlich die gültigen Normen berücksichtigt, da diese den Stand der Technik abbilden und durch Expertengremien stetig aktuell gehalten werden. Neben den Normen sind auch Standardliteraturwerke des Bauwesens wichtige Grundlagen für die Definition des Standards, da diese insbesondere Informationen über Regelquerschnitte und Praxiserfahrungen bieten. Herangezogen werden im Wesentlichen folgende Werke:

- Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1 und 2
- Schneider Bautabellen
- Neufert Entwurfslehre

Außerdem werden die gesetzlichen Anforderungen der Musterbauordnung (MBO) und des GEG zu Grunde gelegt.

Nach der Definition des Standards werden zu bestimmten Modulen Alternativen entwickelt. Dabei wurde als Hauptquelle die Website [dataholz.eu](http://dataholz.eu) berücksichtigt. Diese Plattform bietet geprüfte und zugelassene Holzbauteile.

### 3.1.2. Modellentwicklung

Die Modellentwicklung erfolgt in fünf Hauptschritten. Der definierte Standard der Baukonstruktion von Wohngebäuden wird in Form von Moduldatenblättern beschrieben. Jedes Moduldatenblatt entspricht einem Bauteil der Baukonstruktion oder einer bestimmten Raumnutzung. In der Regel ist ein Bauteil des Rohbaus oder der Gebäudehülle in einem Modul beschrieben. Bei dem nicht-technischen Ausbau einer bestimmten Raumnutzung, wie beispielsweise Bädern, werden die Bauteile der Wände, Böden und Decken einem Modul zugeordnet. Die Moduldatenblätter enthalten alle verwendeten Baustoffe der zugeordneten Bauteile.



In den weiteren Schritten werden auf Ebene der Bauteile bzw. -leistungen alle Informationen bzgl. Verbräuche von grauer Energie, fossiler Treibhausgasemissionen, Baupreise und Bauteilnutzungsdauern verknüpft. Weiter erfolgt auf der Bauteilebene die Ermittlung der Kosten für die CO<sub>2</sub>-Bepreisung.

Die Werte zum Verbrauch von grauer Energie und zu den fossilen Treibhausgasemissionen beruhen auf der Datenbank ÖKOBAUDAT in der aktuellen Version 2021-II vom 25.06.2021. Die Baupreise werden von der kommerziellen Plattform baupreislexikon.de des Anbieters f:Data GmbH entnommen. Die Nutzungsdauern der Bauteile entsprechen den Tabellen des BNB. Die angesetzten CO<sub>2</sub>-Preise entsprechen den gesetzlich festgelegten Preisen in Deutschland für die Jahre 2021 und 2025 (25 € und 55 € pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq.). Ferner wird ein CO<sub>2</sub>-Preis von 130 € pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. berücksichtigt, welcher einem Vorschlag aus einer Studie des Potsdam-Institut für Klimaforschung entspricht.

### **3.1.3. Anwendung und Validierung mit Realbeispiel**

Nach Entwicklung des Modells findet die Anwendung und Validierung mit einem Realbeispiel statt. Bei dem Realbeispiel handelt es sich um ein bereits abgeschlossenes Projekt, welches zwischen den Jahren 2015 und 2018 in München geplant und realisiert wurde.

Mit Anwendung des Modells anhand des Realbeispiels wird die Modellnutzung exemplarisch aufgezeigt. Weiter wird mit dem Realbeispiel validiert, ob bei der Modellentwicklung hinsichtlich der Bauweise und Herstellungskosten sinnvolle Annahmen getroffen wurden.

## 4. Modellentwicklung

### 4.1. Grundlagen des Modells

#### 4.1.1. Ziele des Modells und Definition eines Baustandards

Das Modell strebt das primäre Ziel an, mittels weniger Eingabeparameter aussagekräftige und leicht verständliche Ergebnisse hinsichtlich der Ökonomie und Ökologie eines Wohngebäudes zu liefern. Das Modell soll insbesondere in frühen Konzeptions- und Planungsphasen von Wohnbauentwicklungen einen Mehrwert bieten. Adressiert wird das Modell nicht ausschließlich an Fachkräfte, sondern beispielsweise auch an Investierende, die Entscheidungen im Bauwesen zu treffen haben.

Mit der Definition eines Baustandards soll das Ziel verfolgt werden, dem aktuellen Stand der Technik gerecht zu werden. Um dieses zu erreichen, werden hauptsächlich aktuell gültige Normen berücksichtigt. Die Basis des Modells bilden die Standardmodule, die die wesentliche Baukonstruktion (KG 310 bis 360 gemäß DIN276:2018-12) von Wohngebäuden abbilden. Daneben werden Alternativmodule entwickelt, die eine andere Bauweise, wie hier zunächst die Holzbauweise, aufweisen. Durch die Möglichkeit der Substitution einzelner Standardmodule mit äquivalenten Alternativmodulen kann aufgezeigt werden, wie eine Änderung der Bauweise sich auf Lebenszykluskosten, Verbrauch von grauer Energie und fossilen Treibhausgasemissionen auswirken.

#### 4.1.2. Spezifika Wohngebäude

Wohngebäude sind entsprechend ihrer Nutzung Gebäude, die primär dem Wohnen dienen. Die Definition des Wohnens ist wiederum sehr individuell. Die Lebensformen der Menschen sind sehr vielfältig. Deshalb ist die Nachfrage nach Wohnungen, die nutzungsneutral beschaffen sind, heutzutage die Regel (Grütter, 2021).

Zu unterscheiden ist zum einen das Wohngebäude als solches und zum anderen die Wohnungen selbst. Das Wohngebäude kann als semi-öffentlicher Bereich der Bewohner angesehen werden, da hier nur ein beschränkter Personenkreis Zugang/Nutzungsrechte besitzt, aber auch kein Anspruch auf Privatheit des Einzelnen besteht. Ein Wohngebäude besteht nach Grütter (2021) aus folgenden allgemeinen Bereichen:

- Gebäudeaussenhaut/Fassade

#### Modellentwicklung

- Gebäudevorplatz
- Gebäudeeingangsbereich
- Gebäudeinterne Erschließung der Wohnungen
- Gemeinschafts- und Nebenräume

Gemäß Krebs (2017) ist der Grundriss bzw. die Nutzungsbereiche einer Wohnung von den alltäglichen Abläufen geprägt. Eine Wohnung besteht im Allgemeinen aus:

- Wohnungseingang/Verkehrsflächen in der Wohnung/Flur
- Aufenthaltsbereich/Wohnzimmer
- Küche und Essbereich
- Schlafzimmer
- Kinderzimmer
- Arbeitsbereich
- Bad/WC
- Neben- und Abstellräume
- ggf. privater Außenraum

Bei der Modellentwicklung werden Wohnungseingangsbereiche und Bäder separat betrachtet und unter den Aufenthaltsräumen die Aufenthaltsbereiche/Wohnzimmer, Schlafzimmer, Kinderzimmer und Arbeitsbereiche zusammengefasst betrachtet. Die Neben- und Abstellräume sowie die privaten Außenräume werden im Modell nicht vorgesehen.

#### **4.1.3. Standardmodule**

Grundsätzlich wird das Ziel verfolgt, ein generisches Modell zu entwickeln, welches für verschiedene Gebäudetypen anwendbar ist. Der Standard wird aus den Anforderungen an Wohngebäuden entwickelt, sodass bestimmte Spezifika des Wohnungsbaus im Modell berücksichtigt sind, die nicht unbedingt für andere Nutzungsarten bzw. **Modellentwicklung**

Gebäudetypen gelten. Die Besonderheiten des Wohnungsbaus sind in den folgenden Abschnitten transparent dargelegt. Diese sind bei Einsatz des Modells von Seiten der Anwendenden zu bewerten und ggf. fallspezifisch anzupassen.

Das Modell betrachtet die Baukonstruktion in einzelnen Modulen. Ein Modul entspricht der Definition vom Dudenverlag (2022). Dieser definiert ein Modul als ein „austauschbares, komplexes Element innerhalb eines Gesamtsystems, eines Gerätes o. Ä., das eine geschlossene Funktionseinheit bildet“. Die Untergliederung in Module erfüllt den Zweck, dass jedes Standardmodul durch Alternativmodule ersetzt werden kann und ein differenzierter Vergleich sowie eine Analyse von einzelnen Modulen ermöglicht wird. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, werden an alle Module dieselben Anforderungen gestellt, welche in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

Die Struktur der Standardmodule orientiert sich an die erste Gliederungsebene der KG gemäß DIN 276:2018-12. Jedes Modul besteht aus mindestens einem Bauteil.

Jedes Standardmodul ist fester Bestandteil des Modells und wird bei der Auswertung mitberücksichtigt. Eine Auswahl zwischen zwei Optionen ist lediglich bei der Ausführungsart der Baugrube möglich. So kann bei der Anwendung des Modells zwischen den Varianten „Baugrube mit Böschung“ und „Baugrube mit Spundwandverbau“ gewählt werden.

#### **4.1.4. Alternativmodule**

Neben den Standardmodulen werden im Modell Alternativen zu den Standardmodulen entwickelt. Die Alternativmodule berücksichtigen die Holzbauweise. Mit der Holzbauweise als Alternative zur Massivbauweise bzw. Stahlbetonbauweise soll in der späteren Auswertung analysiert werden, welche Auswirkungen sich auf den Verbrauch von grauer Energie, das fossile Treibhauspotenzial und die Lebenszykluskosten ergeben.

In den Alternativmodulen werden grundlegende Elemente der Tragkonstruktion und des nicht-technischen Ausbaus durch Holzbauteile ersetzt. Nicht zu allen Standardmodulen wird ein Alternativmodul entwickelt. Die spätere Ergänzung des Modells mit weiteren Modulen ist unter Berücksichtigung der hier angewendeten Methodik möglich.

#### **4.1.5. Aufbau Datenblatt**

Jedes Modul des Modells besitzt ein eigenes Datenblatt, in dem alle Bauteile inklusive der damit verbundenen Bauleistungen aufgelistet sind. Der Aufbau des Datenblatts ist

**Modellentwicklung**

für alle Module gleich. Auf Ebene der Bauteile bzw. Bauleistungen sind die Informationen zu Bauteilnutzungsdauern, Preisen, grauer Energie, fossilen Treibhausgasemissionen und CO<sub>2</sub>-Steuern enthalten. Die Verknüpfung mit den vorgenannten Kennwerten wird in den Abschnitten 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 und 4.4.4 erläutert. Der detaillierte Aufbau des Datenblatts ist Abbildung 3 zu entnehmen.

Modulnummer	Bilanzierung PENRT [MJ] und GWP-fossil [kg CO <sub>2</sub> eq.] (Ökobaudat 2021-II)												Lebenszykluskostenberechnung				Kosten durch CO <sub>2</sub> -Beimessung																											
Kosten- gruppe gem. DIN 276	Modul- bezeichnung	Ein- heit	Formel- num- mer	Menge	Lebens- dauer gem. BNB	Aus- tausch- rate	Bilanzierung PENRT [MJ] und GWP-fossil [kg CO <sub>2</sub> eq.] (Ökobaudat 2021-II)												Einheitspreis [€/Einheit] (baupreis- lexikon.de)	Gesamt- kosten	Phase	CO <sub>2</sub> - Beimessung an (25 €/t CO <sub>2</sub> eq)	CO <sub>2</sub> - Beimessung an (55 €/t CO <sub>2</sub> eq)	CO <sub>2</sub> - Beimessung an (130 €/t CO <sub>2</sub> eq)																				
							A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7							C1	C2	C3	C4	D	D inkl. Instand- setzung	Gesamt A-C	Gesamt A	Gesamt B	Gesamt C	Gesamt D	Summe A	Summe B	Summe C	Summe A-C					
	PENRT/ GWP-fossil																																											
	PENRT																																											
	GWP-fossil																																											
	PENRT																																											
	GWP-fossil																																											
	PENRT																																											
	GWP-fossil																																											
	PENRT																																											
	GWP-fossil																																											
	PENRT																																											
	GWP-fossil																																											
	Summe PENRT [MJ]																																											
	Summe GWP-fossil (kg CO <sub>2</sub> eq.)																																											

Abbildung 3 Muster des Moduldatenblatts, eigene Darstellung Modellentwicklung

## 4.2. Anforderungen und Annahmen des Modells

### 4.2.1. Gesetzliche Anforderungen

Bei der Konzeption und Planung von Wohngebäuden sind die gesetzlichen Anforderungen einzuhalten. So sind u. a. die Landesbauordnung bzw. MBO, das Baugesetzbuch (BauGB) und das GEG bei der Planung von Wohngebäuden zu berücksichtigen.

#### 4.2.1.1 Aufenthaltsräume

Ein zentraler Bestandteil von Wohngebäuden sind Aufenthaltsräume. Die MBO definiert in § 2 Abs. 5 Aufenthaltsräume als „Räume, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt oder geeignet sind“ (2019, S. 7).

Entsprechend dem § 47 der MBO (2019, S. 39) müssen Aufenthaltsräume in Wohngebäuden der Gebäudeklasse 5 (vergleiche Tabelle 5) eine lichte Raumhöhe von mindestens 2,40 m aufweisen. Das Modell wird so entwickelt, dass die Anforderungen der Gebäudeklasse aus der MBO erfüllt werden. Die lichte Raumhöhe wird eine Variable des Modells darstellen und kann von Anwendenden als Eingabeparameter projektspezifisch festgelegt werden. So ist von den Anwendenden, die Anforderung der MBO an die lichte Raumhöhe zu beachten.

Außerdem muss gemäß § 47 Abs. 2 der MBO (2019, S. 39) jeder Aufenthaltsraum eine natürliche Lichtquelle (Tageslicht) besitzen. Weiter müssen die Fenster ein Mindestrohbaumaß in Höhe eines Achtels der Netto-Grundfläche des Raumes aufweisen. Nach Einschätzung des Fensterherstellers Velux ist das Mindestrohbaumaß nach MBO zu gering und wird den Bedürfnissen von Menschen nicht gerecht. Als Faustformel für ein optimales Fensterflächenmaß gibt der Hersteller an, 20 bis 25 % der Raumfläche anzusetzen (VELUX Deutschland GmbH, 2022). Daher berücksichtigt das Modell für die Fensterflächen einen Ansatz von einem Fünftel der Geschossgrundflächen.

Des Weiteren ist nach § 47 Abs. 2 der MBO (2019, S. 39) für ausreichende Belüftung Sorge zu tragen, wobei nicht vorgegeben wird, ob dies auf natürliche oder künstliche Weise umgesetzt werden muss. Das Modell basiert auf der Grundannahme, dass jedes Zimmer, mit Ausnahme der Wohnungseingangsbereiche, über die Fenster auf natürliche Weise belüftet wird.

#### 4.2.1.2 Mindestausstattung Wohnungen

Gemäß dem § 48 MBO (2019, S. 39) muss jede Wohnung eine Küche oder Kochnische haben. Auf Fenster in der Küche kann verzichtet werden, wenn eine wirksame Lüftung gewährleistet wird. Ferner sind „leicht erreichbare und gut zugängliche Abstellräume für Kinderwagen und Fahrräder sowie für jede Wohnung ein ausreichend großer Abstellraum herzustellen“ (MBO, 2019, S. 39). Das Modell setzt voraus, dass die Abstellräume für Kinderwagen und Fahrräder im Leistungsbereich der Außenanlagen umgesetzt werden und somit nicht bei der Baukonstruktion zu berücksichtigen sind. Die großen Abstellräume, die zu jeder Wohneinheit herzustellen sind, werden im Modell in den Untergeschossen verortet.

Darüber hinaus muss gemäß § 48 der MBO (2019, S. 39) jede Wohnung ein Bad mit Badewanne oder Dusche und eine Toilette besitzen. In dem Modell werden Bäder als Nassräume verstanden (Nähere Erläuterungen in Abschnitt 0).

#### 4.2.1.3 Brandschutzanforderungen

Die Brandschutzanforderungen der MBO an Wohngebäude richten sich an der Gebäudeklasse des zu bauenden Gebäudes aus. Die MBO unterscheidet, wie in Tabelle 5 dargestellt, fünf bzw., unter Berücksichtigung der Sonderbauten, sechs Gebäudeklassen.

Gebäudeklassen	Maßgebende Kriterien
Gebäudeklasse 1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Freistehende Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m<sup>2</sup></li><li>• Land- oder forstwirtschaftlich genutzte Gebäude</li></ul>
Gebäudeklasse 2	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m<sup>2</sup></li></ul>
Gebäudeklasse 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sonstige Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m</li></ul>
Gebäudeklasse 4	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gebäude mit einer Höhe bis zu 13 m und Nutzungseinheiten mit jeweils nicht mehr als 400 m<sup>2</sup></li></ul>
Gebäudeklasse 5	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sonstige Gebäude einschließlich unterirdischer Gebäude</li></ul>
Sonderbauten	<ul style="list-style-type: none"><li>• Hochhäuser mit einer Höhe von mehr als 22 m</li><li>• Bauliche Anlagen mit einer Höhe von mehr als 30 m</li></ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebäude mit mehr als 1 600 m<sup>2</sup> Fläche des Geschosses mit der größten Ausdehnung, ausgenommen Wohngebäude und Garagen</li> <li>• Verkaufsstätten, deren Verkaufsräume und Ladenstraßen eine Fläche von insgesamt mehr als 800 m<sup>2</sup> haben</li> <li>• Gebäude mit Räumen, die einer Büro- oder Verwaltungsnutzung dienen und einzeln mehr als 400 m<sup>2</sup> haben</li> <li>• Gebäude mit Räumen, die einzeln für eine Nutzung durch mehr als 100 Personen bestimmt sind</li> <li>• Versammlungsstätten</li> <li>• Gaststätten mit mehr als 40 Gastplätzen in Gebäuden oder mehr als 1 000 Gastplätzen im Freien, Beherbergungsstätten mit mehr als zwölf Betten und Spielhallen mit mehr als 150 m<sup>2</sup></li> <li>• Gebäude mit Nutzungseinheiten zum Zweck der Pflege oder Betreuung von Personen mit Pflegebedürftigkeit oder Behinderung, deren Selbstrettungsfähigkeit eingeschränkt ist, wenn die Nutzungseinheiten <ul style="list-style-type: none"> <li>○ einzeln für mehr als 6 Personen oder</li> <li>○ Für Personen mit Intensivpflegebedarf bestimmt sind, oder</li> <li>○ einen gemeinsamen Rettungsweg haben und für insgesamt mehr als 12 Personen bestimmt sind</li> </ul> </li> <li>• Krankenhäuser</li> <li>• sonstige Einrichtungen zur Unterbringung von Personen sowie Wohnheime</li> <li>• Tageseinrichtungen für Kinder, Menschen mit Behinderung und alte Menschen, in denen mehr als zehn Personen betreut werden</li> <li>• Schulen, Hochschulen und ähnliche Einrichtungen</li> <li>• Justizvollzugsanstalten und bauliche Anlagen für den Maßregelvollzug</li> <li>• Camping- und Wochenendplätze</li> <li>• Freizeit- und Vergnügungsparks</li> <li>• fliegende Bauten, soweit sie einer Ausführungsgenehmigung bedürfen, sowie Fahrgeschäfte, die keine fliegenden Bauten und nicht verkehrsfrei sind</li> <li>• Regale mit einer Oberkante Lagerguthöhe von mehr als 7,50 m</li> <li>• bauliche Anlagen, deren Nutzung durch Umgang mit oder Lagerung von Stoffen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr verbunden ist</li> <li>• Anlagen und Räume, die in den vorherigen Punkten nicht aufgeführt und deren Art oder Nutzung mit vergleichbaren Gefahren verbunden sind</li> </ul>
--	---

Tabelle 5 Gebäudeklassen gemäß MBO, (MBO, 2019, § 2, Abs. 3 und 4)

Bei der Entwicklung des Modells werden Wohngebäude berücksichtigt, die der Gebäudeklasse 5 entsprechen. Die im Modell betrachteten Wohngebäude weisen somit eine maximale Gebäudehöhe von bis zu 22 m auf.

Gemäß dem § 27 MBO (2019, S. 22) „müssen tragende und aussteifende Wände und Stützen ausreichend lang im Brandfall standsicher sein“. So sind die tragenden Bauteile bei der Gebäudeklasse 5 in allen Geschossen feuerbeständig auszuführen. In § 28 MBO (2019, S. 22-23) wird vorgegeben, dass *„Außenwände und Außenwandteile wie Brüstungen und Schürzen so auszuführen sind, dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist“*. Weiter gilt für nichttragende Außenwände und nichttragende Teile tragender Außenwände, dass diese aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen müssen.

Zur Vereinfachung und Reduzierung vieler verschiedener Ausführungsvarianten werden in dem Modell alle tragenden Bauteile und nichttragenden Außenwände, wie die Attika, feuerbeständig ausgeführt. Das bedeutet, dass die Bauteile unter Feuereinwirkung für mindestens 90 min die Tragfähigkeit und raumabschließende Wirkung beibehalten. Um das zu erreichen, werden entweder nichtbrennbare Baumaterialien verwendet oder eine zusätzliche Verkapselung, also nichtbrennbare Beplankung mit z. B. Feuerschutzplatten, vorgesehen.

Weiter heißt es im § 28 der MBO (2019, S. 22-23), dass *„Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen einschließlich der Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein müssen“*. Auch diese Anforderung wird im Modell durch einen grundsätzlichen Einsatz von nichtentflammbaren Oberflächen und Bekleidungen von Außenwänden eingehalten.

Trennwände müssen gemäß § 29 MBO (2019, S. 23-24) *„als raumabschließende Bauteile von Räumen oder Nutzungseinheiten innerhalb von Geschossen ausreichend lang widerstandsfähig gegen die Brandausbreitung sein. Trennwände sind erforderlich zwischen Nutzungseinheiten sowie zwischen Nutzungseinheiten und anders genutzten Räumen, ausgenommen notwendigen Fluren; zum Abschluss von Räumen mit Explosions- oder erhöhter Brandgefahr; zwischen Aufenthaltsräumen und anders genutzten Räumen im Kellergeschoss“*.

Der § 31 gemäß MBO (2019, S. 26-27) gibt vor, dass *„Decken als tragende und raumabschließende Bauteile zwischen Geschossen im Brandfall ausreichend lang standsicher und widerstandsfähig gegen die Brandausbreitung sein müssen“*. Sie müssen in Gebäuden der Gebäudeklasse 5 feuerbeständig sein. Wie bei den Wänden, werden auch die Decken im Modell die Eigenschaft der Feuerbeständigkeit erfüllen.

#### **Modellentwicklung**

Im § 32 der MBO (2019, S. 27-29) wird zudem gefordert, dass „*Bedachungen gegen eine Brandbeanspruchung von außen durch Flugfeuer und strahlende Wärme ausreichend lang widerstandsfähig sein muss*“, z. B. durch eine harte Bedachung. Das Modell erfüllt diese Anforderung durch den Einsatz einer harten Bedachung in Form einer extensiven Begrünung.

#### **4.2.1.4 Stellplätze**

In Bezug auf Stellplätze verlangt die MBO (2019, S. 39-40) im § 49 die Bereitstellung von je einem Stellplatz pro Wohneinheit. Stellplätze werden in der Regel in Tiefgaragen angesiedelt oder im Rahmen der Außenanlagen hergestellt. Beide Varianten werden im Rahmen dieser Arbeit nicht als Modul abgebildet.

#### **4.2.1.5 Energieeffizienz**

Das GEG stellt verbindliche Anforderungen hinsichtlich der Energieeffizienz und damit an die bauphysikalischen Eigenschaften eines Gebäudes. Diese Mindestanforderungen werden in der Baupraxis von Wohngebäuden häufig übererfüllt. Der eigentliche Stand der Technik bzgl. Energieeffizienz entspricht den Anforderungen eines KfW-Effizienzhauses 55. Ein KfW-Effizienzhaus 55 zeichnet sich dadurch aus, dass es nur 55 % der Primärenergie eines GEG-konformen Gebäudes bedarf. Eine weitere Voraussetzung für die Förderung bezieht sich auf den Transmissionswärmeverlust. Dieser muss um 30 % niedriger sein als bei einem Gebäude gemäß GEG. Aus dieser Bedingung folgen direkte Anforderungen an die Gebäudehülle und werden deshalb im Modell mitberücksichtigt.

Ein Indiz dafür, dass der KfW-Effizienzhausstandard 55 den Stand der Technik darstellt, ist die ursprünglich vorgesehene Einstellung der Förderung der Effizienzhausstandardklasse zum 01. Februar 2022. Begründet wurde das durch die hohe Anzahl der Antragsstellungen. So bedeutet die hohe Bereitschaft energieeffizient zu bauen, dass das den neuen Durchschnitt des Bauens darstellt. So sollten nur noch die höheren Standards wie KfW-Effizienzhaus 40 und 40 plus gefördert. Nun hat die KfW am 24.01.2022 verkündet, dass alle Förderprogramme für effiziente Gebäude mit sofortiger Wirkung gestoppt werden (KfW, 2022). Nichtsdestotrotz wird die vorherige Entscheidung des Förderendes des KfW-Effizienzstandards 55 als Anlass gesehen, dass dies den Stand der Technik bei Neubauten von Wohngebäuden abbildet.

Nachfolgende Anforderungen werden an die einzelnen Bauteile der Gebäudehülle gemäß KfW-Effizienzstandard 55 gestellt:

#### **Modellentwicklung**

- Dachflächen, oberste Geschossdecke, Dachgauben:  $U \leq 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Fenster und sonstige transparente Bauteile:  $U_w \leq 0,90 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Dachflächenfenster:  $U_w \leq 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Außenwände, Geschossdecken nach unten gegen Außenluft:  $U \leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Sonstige opake Bauteile (Kellerdecken, Wände und Decken zu unbeheizten Räumen, Wand- und Bodenflächen gegen Erdreich, etc.):  $U \leq 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Türen (Keller- und Außentüren):  $U_D \leq 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Des Weiteren werden Anforderungen an die Gebäudehülle bezüglich Wärmebrücken und spezifische Luftdichtheit gestellt. Diese werden aufgrund des Konzeptionscharakters des Modells nicht berücksichtigt. (KfW, 2020)

#### **4.2.2. Annahmen äußerer Bedingungen**

Die Ausführung von Baukonstruktionen und die damit verbundenen Baumaterialwahlen sind abhängig von äußeren Randbedingungen. Bei der Entwicklung des Modells wird von einem drückenden Grundwasser ausgegangen, sodass bei der Abdichtung der unterirdischen Geschosse (Verweis auf 4.3.2.1) besondere Maßnahmen zu berücksichtigen sind.

#### **4.2.3. Baukonstruktive Grundannahmen**

Das Modell besitzt bestimmte Freiheitsgrade sowie feste Parameter. Die Konstanten betreffen im Wesentlichen die Konstruktion. Prinzipiell ist das Modell in seinen Modulen unendlich erweiterbar. Die Definition zusätzlicher Module erhöht zwar die Genauigkeit der generierten Ausgabewerte, mindert im Gegenzug aber die Übersichtlichkeit und Allgemeingültigkeit des Modells. Das Modell manifestiert in erster Linie den Stand der Technik und kann folglich als Referenzmodell genutzt werden.

Für ein generisches Modell bedarf es ein skalierbares und einheitliches Konstruktions-system, welches sowohl dem theoretischen Anspruch als auch der Realität der Baupraxis gerecht wird. Hauptaugenmerk bei der Wahl des Tragkonstruktionssystems ist ein tragfähiges Tragwerk, welches sinnvolle Annahmen berücksichtigt und den Massen und Volumina von realen Bauwerken nahekommt.

Das Modell soll vorrangig den Geschosswohnungsbau abbilden. Hestermann und Rongen (2015, S. 244) beschreiben Geschossbauten als „mehrgeschossige Konstruktionen (z. B. Gewerbe- und Verwaltungsbauten, Hochhäuser) aus geschosshohen oder auch über mehrere Geschosse durchlaufenden Stützen sowie horizontalen Flachdecken oder Deckenplatten mit Trägern und Unterzügen. Sie werden je nach gewählten Materialien i. d. R. in Abmessungen bis zu 7 m x 10 m im Grundriss sowie Geschosshöhen von ca. 3 m bis ca. 6 m ausgeführt“.

#### 4.2.3.1 Tragkonstruktionssystem

Die erste Grundüberlegung des Modells ist die Trennung des tragenden und des nicht-tragenden Tragwerksystems. Dadurch können die entsprechenden Bauteile unabhängig voneinander betrachtet und skaliert werden. Eine Folge aus dieser Überlegung ist die Wahl des Tragwerksystems auf eine Kombination aus Skelett- und Wandbausystem. Die Standfestigkeit ist durch horizontale und vertikale Bauteile zu gewährleisten. Der Abtrag vertikaler Lasten bzw. die Vertikalaussteifung wird durch die Scheibenwirkungen der Außenwände und durch den Erschließungskern sowie durch die Innenstützen erreicht. Die horizontale Aussteifung ist durch die Deckenscheiben gegeben. Das Tragkonstruktionssystem, wie es im Modell berücksichtigt wird, entspricht der Nummer 7.1a in Abbildung 4.

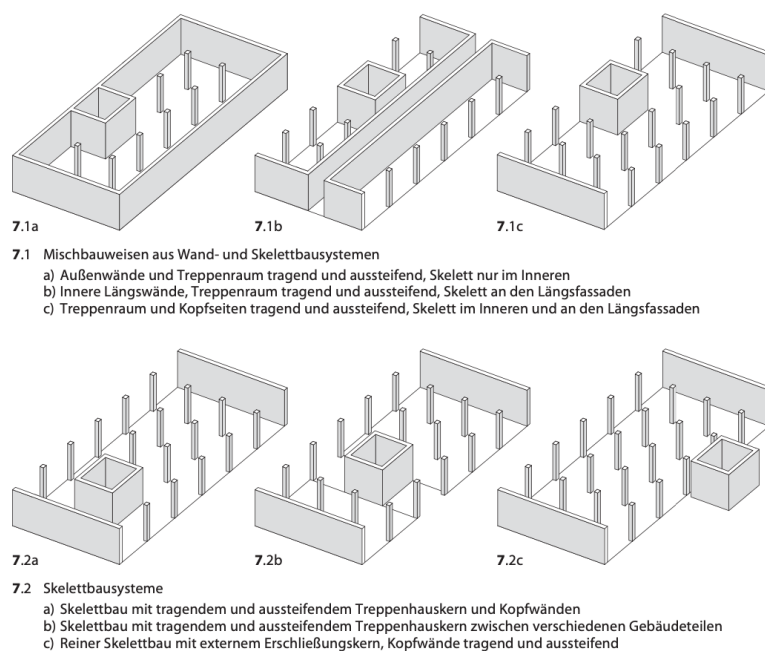


Abbildung 4 Verschiedene Bausysteme, (Hestermann & Rongen, 2015, S. 243)

## Modellentwicklung

#### **4.2.3.2 Stützenraster**

Hestermann und Rongen (2015, S. 251) geben als optimale Rastermaße für verschiedene Bauweisen folgende Raster an:

- Stahlbeton: 5 – 6 m
- Holzbau: 3,5 – 5 m
- Stahlskelettbau: 5,5 – 7,5 m
- Verbundkonstruktionen: 8 – 10 m

Bei diesen Rastermaßen besteht ein optimales Verhältnis zwischen den Kostenanteilen für Stützen, Unterzüge und Decken.

Für das Modell wird ein Quadratraster mit gleichen Stützenabständen in Längs- und Querrichtung von fünf Metern angesetzt. Durch die kreuzweise gespannten und vierseitig gelagerten Decken wird eine optimale Statik im Modell berücksichtigt. Dieses Stützenraster kann durch alle Bauweisen umgesetzt werden. Für die Bauweisen Stahlbeton und Holzbau stellt das Stützenmaß ein wirtschaftlich optimales Maß dar. Es besteht kein signifikanter ökonomischer Nachteil für eine der beiden Bauweisen. Des Weiteren wird das gewählte Stützenraster auch einer Büronutzung gerecht. Hier hat sich als Grundeinheit ein Vielfaches von 1,20 m bis 1,35 m erwiesen (Hestermann & Rongen, 2015, S. 251).

#### **4.2.3.3 Flachdecke**

Zur Vereinfachung des Modells sind die Geschossdecken als unterzugsfreie Flachdecken ausgebildet. Diese weisen in der Regel höhere Materialkosten auf, sind aber einfacher auszuführen, da die Schalung der Unterzüge entfällt.

#### **4.2.3.4 Gebäudehülle**

Alle innenliegenden Räume werden theoretisch beheizt, sodass bei der kompletten Gebäudeaußenhülle inkl. außenliegender Bauteile der Untergeschosse eine Außendämmung vorgesehen wird.

#### **4.2.4. Annahmen bestimmter Grundflächen**

Die Flächen der Küchen-, Nassräume sind in dem Modell als Konstanten angenommen. Jede Wohneinheit hat eine Küche mit einer Fläche von 10 m<sup>2</sup> und ein Badezimmer (Nassraum) mit einer Fläche von 6 m<sup>2</sup>. Hinzu kommt ein Wohnungseingangsbereich mit

**Modellentwicklung**

einer Verkehrsfläche von  $2,5 \text{ m}^2$  pro Aufenthaltsraum der Wohnung. Die Fläche ist also ein Vielfaches von  $2,5 \text{ m}^2$ , die sich nach der Anzahl der Aufenthaltsräume der Wohnung richtet. Eine Wohneinheit mit drei Aufenthaltsräumen verfügt somit beispielsweise über einen Wohnungseingangsbereich bzw. Wohnungsflur mit einer Fläche von  $7,5 \text{ m}^2$ .

Das Treppenhaus besitzt eine feste Grundfläche von  $14,25 \text{ m}^2$ , die sich aus einer Breite von  $2,5 \text{ m}$  und einer Länge von  $5,7 \text{ m}$  ergibt (Verweis auf Abschnitt 4.3.2.11).

Alle Aufenthaltsräume weisen in dem Modell die gleiche Grundfläche auf und stehen in Abhängigkeit zu den Eingabeparametern und Konstanten des Modells. Die Gesamtfläche der Aufenthaltsräume ergibt sich aus der Grundfläche des Gebäudes multipliziert mit den oberirdischen Geschossen abzüglich der vorgenannten konstanten Flächen der Küchen- und Nassräume, Wohnungseingangsbereiche je Wohneinheit sowie des Treppenhauses. Die Gesamtfläche teilt sich dann zu gleichen Teilen auf und ergibt die Fläche eines Aufenthaltsraums.

Folglich würde sich bei einem Gebäude mit einer Grundfläche von  $200 \text{ m}^2$  und drei oberirdischen Geschossen eine Geschossfläche von  $600 \text{ m}^2$  ergeben. Unter weiterer Annahme von drei Wohneinheiten je Geschoss, die jeweils zwei Aufenthaltsräume verfügen, ergibt das eine Gesamtfläche der Aufenthaltsräume von  $368,25 \text{ m}^2$  bzw. eine Fläche von  $20,46 \text{ m}^2$  je Aufenthaltsraum.

### 4.3. Standardmodulstruktur

In den folgenden Abschnitten werden die spezifischen Grundlagen und Annahmen der einzelnen Module beschrieben, sodass Lesende dieser Arbeit in der Lage sind, die vom Autor durchgeführten Herleitungen nachzuvollziehen und ggf. projektspezifische Anpassungen an dem Modell durchzuführen zu können.

Vor der detaillierten Beschreibung der Module wird noch einmal das Gesamtbild des Referenzgebäudes, wie es bei Modellentwicklung betrachtet wird, zusammengefasst. Es wird von einem mehrgeschossigen und unterkellerten Wohngebäude in der Stahlbetonbauweise ausgegangen. Die unterirdischen Geschosse werden aus wasserundurchlässigem Beton (WU-Beton) ausgeführt, da von drückendem Wasser angenommen wird. Das Dach ist als Flachdach ausgebildet und extensiv begrünt. Die Fassade ist mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) versehen. Die Tragkonstruktion besteht

#### **Modellentwicklung**

horizontal aus unterzugsfreien Flachdeckenplatten und vertikal aus scheibenwirksamen Außenwänden, einem Treppenhaukern und tragenden Innenstützen. Wohneinheiten werden ausschließlich in den oberirdischen Geschossen (Erdgeschoss, Obergeschosse und Dachgeschoss) vorgesehen. Das Modell geht davon aus, dass in den Untergeschossen die Lager- und Technikräume angesiedelt sind. Für diese Raumnutzungen werden keine Module des Ausbaus entwickelt, es werden lediglich die Flächen für einen Ausbau geschaffen. Dies ist bei der Anwendung des Modells zu beachten und ggf. mit Aufschlägen auf den Ergebniswerten auszugleichen.

Es werden grundsätzlich bei jedem Modul die jeweiligen Herstellungsprozesse erläutert. Der Prozess der Instandsetzungen entspricht diesem. Der Prozess des Abbruchs wird nicht gesondert erläutert. Bei dem Abbruch aller Module des Gebäudes wird von einem selektiven, also stofflich separiertem, Rückbau in dem Modell ausgegangen.

#### **4.3.1. Standardmodule Baugrube**

##### ***4.3.1.1 Baugrube mit Böschung (Modulnummer 001)***

In dem Modell wird eine Unterkellerung des Gebäudes und folglich eine Baugrube vorgesehen. So ist während der Ausführungsphase die Baugrubensicherheitsicherung durch eine Böschung, einen Verbau oder einer anderweitigen Sicherung zu gewährleisten.

Das Modell enthält zwei Verfahren der Baugrubenerstellung zur Auswahl. Zum einen die Ausführung mit einer Baugrubenböschung und zum anderen die Ausführung mit einem Baugrubenverbau mit Spundwänden. Neben dem Verbau mit Spundwänden gibt es weitere Verbauarten wie Trägerbohl- oder Bohrpfahlwände. Diese können im Modell als weitere Module ergänzt werden.

Zwischen den beiden Standardmodulen „001 – Baugrube geböscht“ und „002 – Baugrube Spundwand“ ist bei der Modellanwendung eine Wahl zu treffen. Grundlage für die Wahl der Baugrubenausführung, Gründungsart und konstruktiven Bemessung des Gebäudes sind die vorliegenden Baugrundverhältnisse, genauer die Boden- und Grundwasserverhältnisse sowie die Platzverhältnisse des zu bebauenden Grundstücks. Dazu wird in der Regel zu Beginn der Planungen von einem Sachverständigen ein geotechnischer Bericht erstellt. Grundwassersenkungs- und Grundwasserhaltungsmaßnahmen sind bei den Standardmodulen 001 und 002 nicht enthalten. (Hestermann & Rongen, 2015)



Des Weiteren werden zu Beginn von Baugrundmaßnahmen Laboruntersuchungen des Bodens bzgl. Kontaminationen durch Altlasten durchgeführt und der Boden in eine LAGA-Klasse eingestuft. In Deutschland sind gemäß Bundes-Bodenschutzgesetz alle Grundstücksbesitzenden verpflichtet, Böden so weit zu sanieren, dass von diesen keine Gefahren mehr ausgehen können. Im Modell wird davon ausgegangen, dass der Boden die LAGA-Klasse Z0 (uneingeschränkter Einbau), also keine Schadstoffbelastung, aufweist. Der entstehende Bodenaushub wird zur Verfüllung des Arbeitsraums wiederverwendet. Überschüssiger Bodenaushub wird zu einer Verwertungsanlage transportiert und für eine anderweitige Wiederverwendung aufbereitet. (Hestermann & Rongen, 2015)

Der schematische Ablauf des Herstellungsprozesses ist in Abbildung 5 vereinfacht dargestellt. Das Modell geht von einem geringen Aufwuchs bis 50 cm Höhe und Unrat auf dem zu bebauenden Grundstück aus. Größere Hindernisse wie unbekannte Reste früherer Bauwerke oder Ähnliches werden nicht angenommen. Nach dem Abräumen des Baugeländes wird der Oberboden abgetragen. Die Schichtdicke des Oberbodens wird mit 10 cm angenommen. Anschließend wird der Boden gelöst und die Baugrube ausgehoben. Vor Beginn der Gründungsarbeiten wird das Planum hergestellt. Nach Abschluss der Arbeiten an den unterirdischen Geschossen wird der Arbeitsraum mit dem seitlich gelagerten Bodenaushub verfüllt. (Hestermann & Rongen, 2015)

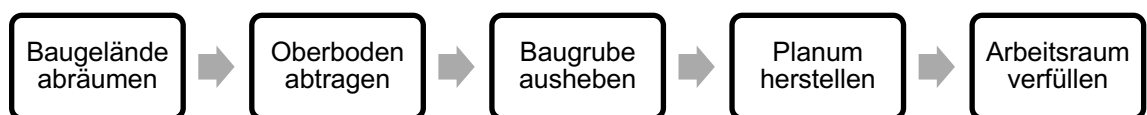


Abbildung 5 Herstellungsprozess Standardmodul Baugrube mit Böschung, eigene Darstellung

Baugrundverbesserungen wie Bodenaustausch, Bodenverdichtung oder Bodenverfestigung sind nicht Teil des Modells.

Bei der Klassifizierung des Bodens wird eine Einstufung in Klasse 3 (schwach bindig, kiesiger Boden) gemäß DIN 18 300 angenommen. Die DIN 4124:2012-01 (DIN e.V., 2012, S. 11) gibt bei nicht bindigen oder weichen bindigen Böden einen Böschungswinkel von maximal 45 Grad vor. Je kleiner der Böschungswinkel ist, desto größer wird die auszuführende Baugrube und entsprechend die Kosten. Der Böschungswinkel wird deshalb mit dem größtmöglichen Böschungswinkel (45 Grad) für diese Bodenklasse angesetzt.

#### Modellentwicklung

Bei tieferen Baugruben von mehr als drei Meter Tiefe sind Bermen mit einer Breite von 1,5 m vorzusehen. Das Modell berücksichtigt keine Bermen. Bei der geböschten Baugrube wird gemäß DIN 4124:2012-01 (DIN e.V., 2012, S. 36) ein Arbeitsraum von 50 cm zwischen Baugrubenwand und Bauwerk vorgeschrieben.

#### 4.3.1.2 Baugrube mit Spundwandverbau (Modulnummer 002)

Hestermann und Rongen (2015, S. 42) schreiben, dass bei „*fehlender Standfestigkeit des Erdreichs oder aus Platzmangel Abböschungen von Baugruben nicht möglich sind, muss mit Verbau gearbeitet werden*“. In einem Stadtgebiet wie München ist in der Regel von Platzmangel auszugehen, weshalb im Standardszenario des Modells von einer Baugrube mit Spundwandverbau ausgegangen wird.

Der schematische Ablauf des Herstellungsprozesses ist in Abbildung 6 vereinfacht dargestellt. Im Vergleich zum Ablauf der geböschten Baugrube bedarf es drei zusätzlicher Schritte: das Einbringen der Spundwand, die Vorhaltung der Spundwand während der Ausführung der unterirdischen Geschosse und das Ziehen der Spundwand. Die anderen Schritte sind die Gleichen wie bei der geböschten Baugrube. Bei dieser Baugrubenvariante wird gemäß DIN 4124:2012-01 ein Arbeitsraum von 60 cm zwischen Baugrubenwand und Bauwerk vorgegeben.

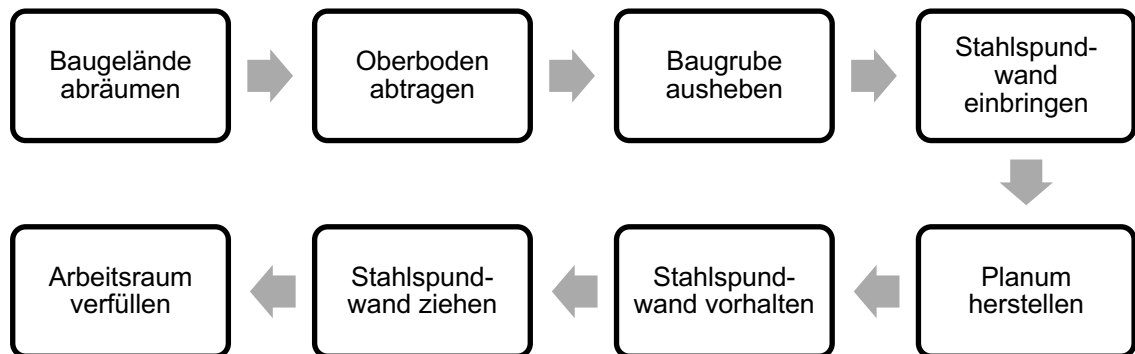


Abbildung 6 Herstellungsprozess Standardmodul Baugrube mit Spundwandverbau, eigene Darstellung

### 4.3.2. Standardmodule Rohbau und Gebäudehülle

#### 4.3.2.1 Bodenplatte aus WU-Beton (Modulnummer 003)

Bei Gründungen von Gebäuden wird grundsätzlich zwischen Flächen- und Tiefgründungen unterschieden. Es wird im Modell von einer ausreichenden Belastbarkeit ausgegangen, weshalb Tiefgründungen wie Bohrpfehlgründungen oder Rammpfehlgründungen im Modell nicht berücksichtigt sind. Diese können als weitere Module ergänzt werden. Bestandteil des Modells ist eine Flachgründung aus Stahlbeton in Form einer ebenen

Bodenplatte. Diese Fundamentart ist laut Bautabellen von Goris (2018, S. 10.23) bei hohen Lasten, wie bei Hochhäusern und drückendem Grundwasser, in Verbindung mit einer Wannenausbildung zu wählen und deckt somit die meisten Lastszenarien ab. Einen weiteren Vorteil der Plattengründung sehen Hestermann und Rongen (2015, S. 61) bei der Wirtschaftlichkeit, da die Herstellung einer einzelnen Platte weniger aufwendig ist als mehrere Einzelfundamente mit ggf. unterschiedlichen Höhenlagen.

Bei den Grundwasserverhältnissen wird von einem gespannten Grundwasser bzw. drückendem Wasser ausgegangen, weshalb besonderes Augenmerk auf die Abdichtung der unterirdischen Gebäudeteile zu legen ist. In der Praxis werden in der Regel die Fundamentplatte und die Außenwände der Untergeschosse als Wanne ausgebildet. Als Wannen kommen zwei mögliche Ausführungsarten in Betracht. Zum einen die sogenannte „schwarze Wanne“ und zum anderen die „weiße Wanne“. Bei der schwarzen Wanne wird eine wasserundurchlässige Abdichtungsschicht angeordnet und bei der weißen Wanne werden die Bauteile aus Stahlbeton mit einem hohen Wassereindringwiderstand hergestellt. In diesem Zusammenhang spricht man von WU-Beton, obwohl das technisch nicht der Fall ist. (Hestermann & Rongen, 2015, S. 62 u. S. 745)

In der Praxis hat sich die Ausbildung einer Gründungswanne aus WU-Beton durchgesetzt. Dabei ist auf eine bestimmte Dicke und Festigkeit des Betons zu achten. Mögliche Einflüsse von benachbarten Bauwerken auf die Art der Gründung sowie die Verlegung von Grundleitungen, Erdungen und sonstigen Kabeln finden im Modell keine Beachtung.

Die Dicke der Bodenplatte ist eine variable Größe innerhalb des Modells und steht in Abhängigkeit zur Gebäudehöhe. In den Schneider-Bautabellen (Goris, 2018, S. 10.23) sind Formeln zur Vorbemessung von Plattenfundamenten gegeben. Die Plattendicke des Fundaments wird im Modell wie folgt berechnet:

$$\text{Plattendicke: } h \approx \frac{\text{Gebäudehöhe } H}{30} \geq 25 \text{ cm bzw. } 30 \text{ cm bei Wannengründung}$$

Gebäudehöhe H = Von Oberkante Fundament bis Oberkante Gebäude

**Formel 1 Vorbemessung Bodenplatte aus Stahlbeton, (Goris, 2018, S. 10.23)**

Der schematische Ablauf des Herstellungsprozesses ist in Abbildung 7 vereinfacht dargestellt. Zunächst wird die Sauberkeitsschicht aus unbewehrtem Magerbeton (C8/10) hergestellt, worauf die PE-Folie als Trennlage aufgelegt wird. Die Perimeterdämmung wird unterhalb der Bodenplatte angeordnet, weshalb vor den Betonarbeiten die **Modellentwicklung**

Dämmung verlegt wird. Anschließend folgen die Schalung und das Einlegen der Perimeterdämmung an den Stirnseiten des späteren Fundaments. Ferner werden die Stahlbewehrung und die Fugenbänder eingelegt, sodass im letzten Schritt die Betonage mit Ortbeton erfolgen kann. (Hestermann & Rongen, 2015)

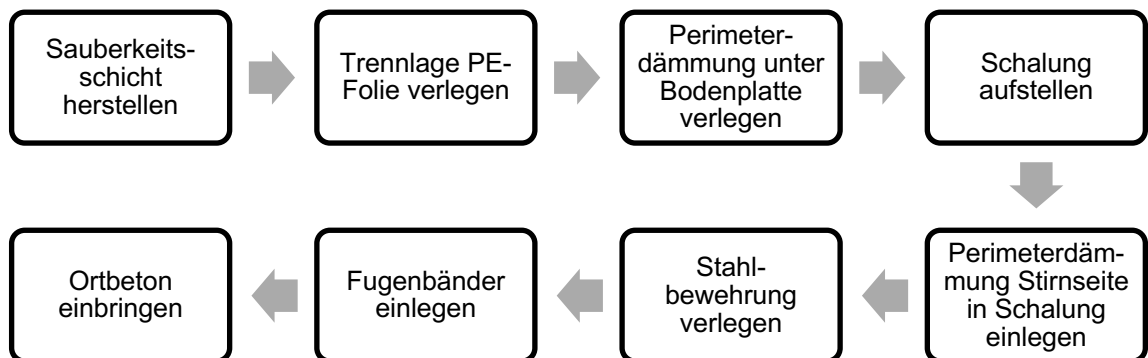


Abbildung 7 Herstellungsprozess Standardmodul Bodenplatte aus WU-Beton, eigene Darstellung

Hestermann und Rongen (2015, S. 137) geben an, dass die Anordnung der Wärmedämmung unterhalb der Bodenplatte immer häufiger zum Einsatz kommt. Dabei ist ein Baustoff mit ausreichender Druckfestigkeit, wie Schaumglas oder Hartschaum, einzusetzen. Im Modell wird als Perimeterdämmung Schaumglas gewählt.

#### 4.3.2.2 Geschossdecken (Modulnummer 004)

Bei den Geschossdecken im Modell handelt es sich um unterzugslose, punktgestützte Stahlbetonplattendecken auf quadratischem, rechteckigem Stützenraster. Durch diese Art der Decken ist eine freie Installationsführung des technischen Ausbaus möglich und die Komplexität der Ausführung wird reduziert. Laut Goris (2018, S. 10.19) liegt der Anwendungsbereich für solche Decken bei niedrigen Gesamtkonstruktionshöhen. So ist zu beachten, dass ggf. eine größere Dimensionierung bzw. weitere konstruktive Maßnahmen wie Unterzüge bei höheren Gebäuden zu berücksichtigen sind und es sich hierbei lediglich um eine Vorbemessung der Massen und Volumina der Konstruktion handelt.

Die Vordimensionierungsformel nach Goris (2018, S. 10.19) für Flachdecken aus Stahlbeton lautet:

$$h_{platte} \approx \frac{l}{25} \text{ bis } \frac{l}{20} > 15 \text{ cm}$$

Formel 2 Vordimensionierung Flachdecke, Goris (2018, S. 10.19)

#### Modellentwicklung

Das ergibt bei einer Stützenweite  $l$  von 5 m eine Plattendicke zwischen 20 bis 25 cm bei einer Betonfestigkeitsklasse C20/25. Für das Modell wird eine Plattendicke von 25 cm und die höhere Betonfestigkeitsklasse C30/37 gewählt, um höheren Gebäudehöhen sowie unregelmäßig angeordneten Trennwänden gerecht zu werden.

Der schematische Ablauf des Herstellungsprozesses ist in Abbildung 8 vereinfacht dargestellt. Als erster Schritt wird die Schalung aufgestellt. Diese besteht aus Deckenplatten und Randschalung. Anschließend erfolgt das Einlegen der Stahlbewehrung und die Betonage. Aussparungen bei den Geschossdecken werden im Modell nicht berücksichtigt.

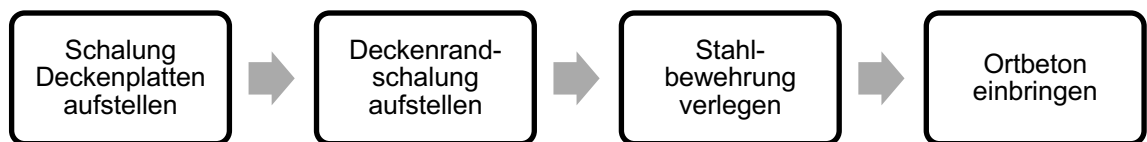


Abbildung 8 Herstellungsprozess Standardmodul Geschossdecke, eigene Darstellung

Die Decken sind so bemessen, dass sie den Nutzungskategorien A (Wohnflächen) und B (Büroflächen) gerecht werden (vergleiche Abbildung 9). Dadurch wird eine spätere Umnutzung von Wohnen zu Büronutzung und andersherum möglich.

Nutzungskategorie		Flächenlast $q_k$
A	Wohnflächen	1,5–2,0 KN/m <sup>2</sup>
B	Büroflächen	2,0–3,0 KN/m <sup>2</sup>
C1 – C5	Flächen mit Personenansammlungen, die nicht unter A, B, oder D fallen	2,0–7,5 KN/m <sup>2</sup>
D1 – D2	Verkaufsflächen Einzelhandel und Kaufhäuser	4,0–5,0 KN/m <sup>2</sup>
E1	Flächen mit möglicher Stapelung von Gütern einschließlich Zugangsflächen	7,5 KN/m <sup>2</sup> empfohlen bzw. tatsächlich erforderliche Last nach Nutzung und Ausstattung
E2	Industrielle Nutzung	$q_k$ entsprechend der vorgesehenen Nutzung und Ausstattung ermitteln

Abbildung 9 Nutzungskategorien nach DIN EN 1991-1-1 mit Angabe der anzurechnenden Nutzlasten im Hochbau, (Hestermann & Rongen, 2015, S. 365)

Die massiven Flachdecken bilden in der Baukonstruktion die horizontale Standsicherheit. Sie nehmen die horizontalen Kräfte, wie z. B. Windlasten, auf und leiten diese über die ausgesteiften Wandscheiben ab. Wenn die Decken mindestens die Wandtiefe aufgelagert sind, dann sind keine zusätzlichen Verbindungsmaßnahmen zwischen Decke und Wand erforderlich. (Hestermann & Rongen, 2015, S. 366)

## Modellentwicklung

#### 4.3.2.3 Dachgeschossdecke (Modulnummer 005)

Der Aufbau der Dachgeschossdecke unterscheidet sich gegenüber den Geschossdecken lediglich bei der zusätzlichen Herstellung einer Deckenöffnung und dem Einbau eines Flachdachausstiegs. Der Flachdachausstieg ist notwendig für die allgemeine Wartung des Daches. Der schematische Ablauf des Herstellungsprozesses ist in Abbildung 10 vereinfacht dargestellt. Die Dachentwässerung ist im Modell bisher nicht berücksichtigt, weshalb auch entsprechende Öffnungen und Leitungen nicht im Modell enthalten sind.

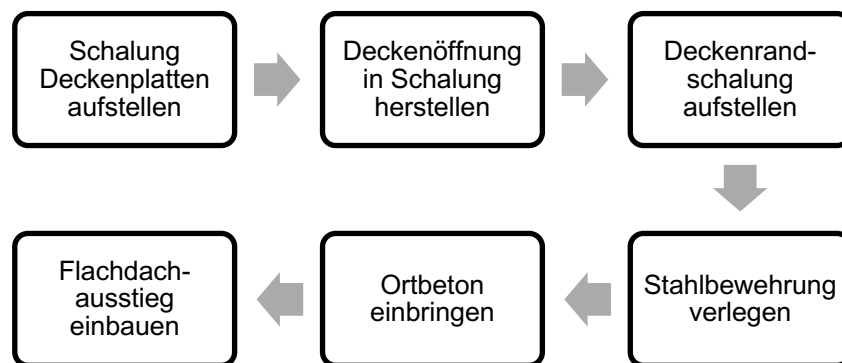


Abbildung 10 Herstellungsprozess Standardmodul Dachgeschossdecke, eigene Darstellung

#### 4.3.2.4 Attika (Modulnummer 006)

Die Attika bildet den Deckenrandabschluss des Daches. Die Attika erfüllt zwei Funktionen. Zum einen dient sie als statisch wirksamer Überzug der Deckenplatte und zum anderen als Anschlussfläche der Flachdachabdichtung. Die Abdichtung ist mindestens 15 cm über der obersten Dachbelagsschicht zu führen. Ein Notüberlauf zur Dachentwässerung ist nicht im Modell enthalten. Der schematische Ablauf des Herstellungsprozesses ist in Abbildung 11 vereinfacht dargestellt.

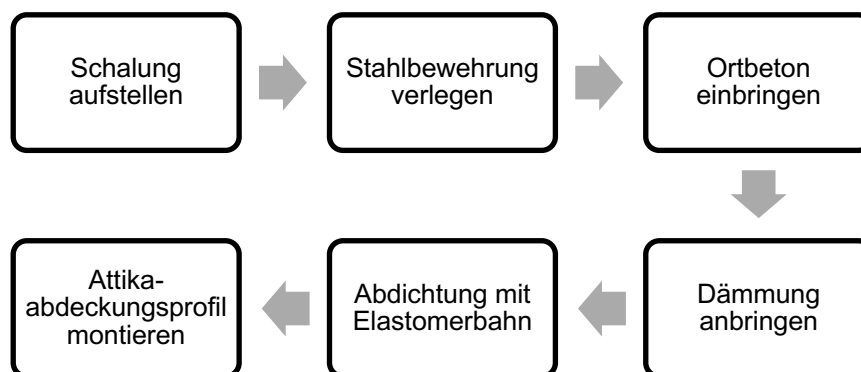


Abbildung 11 Herstellungsprozess Standardmodul Attika, eigene Darstellung

### Modellentwicklung

#### 4.3.2.5 Dachbeläge (Modulnummer 007)

Das Modell legt als Standard der Baukonstruktion ein Flachdach fest. Bei der Ausführung der Dachbeläge von Flachdächern gilt es primär, die Abdichtung gegen Wasser zu gewährleisten. Der schematische Ablauf des Herstellungsprozesses ist in Abbildung 12 vereinfacht dargestellt.

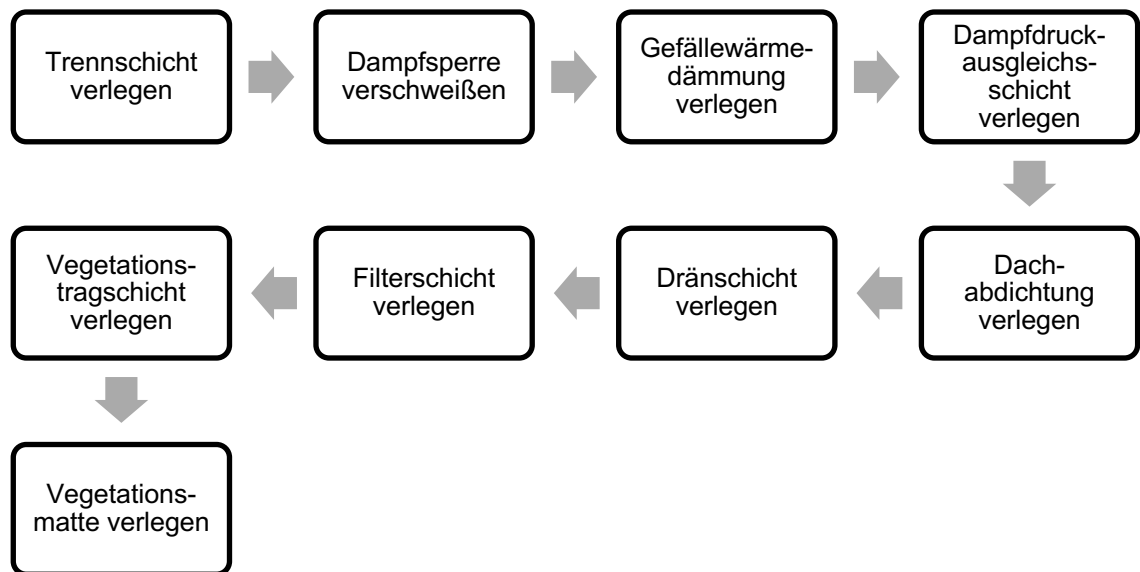


Abbildung 12 Herstellungsprozess Standardmodul Dachbeläge, eigene Darstellung

Der mehrschichtige Aufbau und die damit verbundene Komplexität von Flachdachabdichtungen haben in der Vergangenheit häufig zu Baumängeln geführt. Insbesondere zweischalige Aufbauten mit Hinterlüftung werden vielfach mangelbehaftet ausgeführt und erreichen nicht die angestrebten Funktionen. Der Trend geht aufgrund der Weiterentwicklung der Materialien sowie neue Verlegetechniken wieder zurück zu einfacheren Aufbauten. (Hestermann & Rongen, 2018, S. 307)

Um die volle Funktion hinsichtlich des Feuchte- und Wärmeschutzes sowie der Dauerhaftigkeit des Flachdaches zu gewährleisten, wird im Modell ein einschaliger Flachdachaufbau ohne Hinterlüftung, wie in Abbildung 13 schematisch dargestellt, gewählt. Jede Schicht erfüllt dabei eine gezielte Funktion.

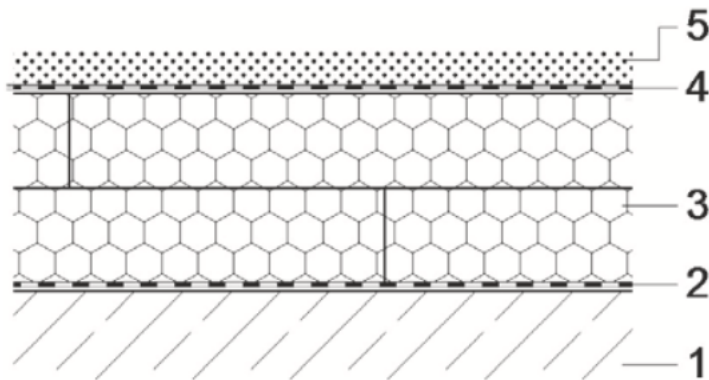


Abbildung 13 Schematischer Aufbau des einschaligen Flachdachs, Hestermann und Rongen (2018, S. 284)

Direkt auf der Dachgeschossdecke (Nummer 1 in Abbildung 13) besteht die erste Lage des Dachbelags (Nummer 2 in Abbildung 13) aus einer Trennschicht aus Glasvlies und einer Dampfsperre aus Bitumenbahnen. Durch die Geschossdecke und die Dampfsperre wird die Luftdichtheit des Daches sichergestellt.

Als Material für die darüber liegende Wärmedämmschicht (Nummer 3 in Abbildung 13) wird Schaumglas genutzt. Schaumglas hält hohen Druckbelastungen stand und kann sowohl bei einem genutzten als auch ungenutzten Dach eingesetzt werden (Hestermann & Rongen, 2018, S. 305). Die Dämmung wird zweilagig und stoßfugenversetzt ausgeführt, sodass Wärmebrücken vermieden werden. Um Wasseransammlungen auf dem Dach zu vermeiden, ist ein Gefälle der Abdichtung von mehr als 5 % empfohlen (Hestermann & Rongen, 2018, S. 281). Erreicht wird dies im Modell durch keilförmige Dämmplatten, die ein Gefälle von 5 % aufweisen.

Die DIN 4108-2:2013-02 stellt Mindestanforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden. Gemäß Tabelle 3 der Norm (DIN e.V., 2013, S. 15) ist bei einem Flachdach ein Wärmedurchlasswiderstand von mindestens  $1,2 \text{ (m}^2\text{*K)/W}$  einzuhalten. Das eingesetzte Schaumglas hat eine Wärmeleitfähigkeit von  $0,040 \text{ W/(m*K)}$  und an der dünnsten Stelle eine Dicke von  $0,2 \text{ m}$ , was einem Wärmedurchlasswiderstand von  $5 \text{ (m}^2\text{*K)/W}$  bzw. einem U-Wert von  $0,2 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$  entspricht. Somit erfüllt bereits die Dämmschicht die Mindestanforderung der Norm und eine Betrachtung der weiteren Bauteilschichten ist nicht notwendig.

Des Weiteren sind den Anforderungen der DIN 4108-10:2021-11 respektive DIN EN 13167:2015-04 Folge zu leisten. Die Schaumglas-Dämmplatten entsprechen

#### Modellentwicklung



dem Anwendungstyp DAA gemäß DIN EN 13167:2015-04 und sind somit für den Einsatz auf Dächern zugelassen.

Die vierte Schicht des Dachbelags (Nummer 4 in Abbildung 13) hat die Funktion der Abdichtung. In dieser Schicht sind eine Dampfdruckausgleichsschicht aus einer lose verlegten Bitumenbahn und eine einlagige Elastomerbahn angeordnet.

Bezogen auf den Brandschutz sind die Anforderungen der MBO, wie bereits in Abschnitt 4.2.1.3 beschrieben, einzuhalten. Grundlegende Anforderung an Dachbeläge ist die Ausführung einer harten Bedachung. Die im Modell gewählte extensive Begrünung gilt als eine harte Bedachung gemäß MBO, wenn der organische Anteil im Substrat weniger als 20 % aufweist und die Substratschicht dicker als 4 cm ist. Das Substrat des Modells besteht hauptsächlich aus Blähton und enthält weniger als 20 % organische Anteile. Außerdem weist das Substrat eine Schichtdicke von 15 cm auf. Somit werden beide Anforderungen einer harten Bedachung erfüllt.

Neben der Eigenschaft der harten Bedachung einer extensiven Begrünung, kann sich eine Dachbegrünung positiv auf die Dauerhaftigkeit des Flachdaches auswirken, da dadurch ein Schutz vor UV-Strahlung erzeugt wird. Ferner werden Niederschläge zurückgehalten und einer Überlastung der Kanalisation entgegengewirkt. (Hestermann & Rongen, 2018, S. 327) Ein weiterer Vorteil der extensiven Dachbegrünung ist, dass diese als schwere Auflast gilt und dadurch das Flachdach ausreichend gegen Windbeanspruchungen wie beispielsweise Windsog absichert.

#### 4.3.2.6 Tragende Außenwände der unterirdischen Geschosse (Modulnummer 008)

Nach den Vorbemessungsregeln von Goris (2018, S. 10.23) ist bei einer Wannengründung eine Wanddicke von mindestens 30 cm einzuhalten. In dem Modell wird deshalb eine Wanddicke der Untergeschosse von 30 cm berücksichtigt. Weiter wird ein Beton mit einer Betondruckfestigkeitsklasse von C30/37 und hohem Wassereindringwiderstand angenommen, um den Schutz gegen drückendes und nichtdrückendes Wasser zu gewährleisten. Der schematische Ablauf des Herstellungsprozesses ist in Abbildung 14 vereinfacht dargestellt.

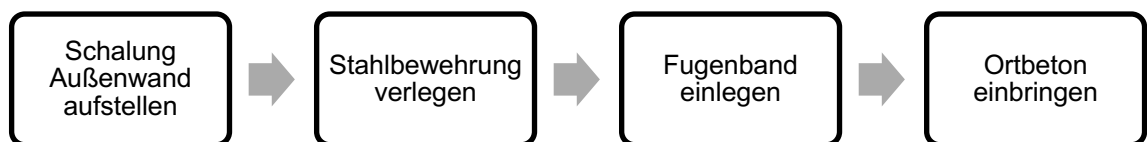


Abbildung 14 Herstellungsprozess Standardmodul tragende Außenwand der unterirdischen Geschosse, eigene Darstellung

#### 4.3.2.7 Tragende Außenwände der oberirdischen Geschosse (Modulnummer 009)

Formeln für die Vorbemessung von tragenden Wänden, wie bei Decken und Stützen, geben Schneider und Albert nicht vor. Sie geben lediglich eine Mindestwanddicke von 10 cm für tragende Wände aus Stahlbeton und eine Betonfestigkeitsklasse von C16/20 an (2018, S. 12.77). Für das Modell wird deshalb eine Annahme getroffen, die sich an der Vorbemessung der Stützen orientiert. Wie in Abschnitt 4.3.2.8 berechnet, weisen die Stützen im Modell einen quadratischen Querschnitt mit einer Seitenlänge von 0,275 m auf.

Da die Außenwände größere Querschnittsflächen als die Innenstützen aufweisen und somit höhere Lasten aufgenommen werden können, wird die Dicke der oberirdischen Außenwände mit 0,25 m angenommen und die Betonfestigkeitsklasse auf C20/25 festgelegt. Zudem wird von einem Bewehrungsanteil von  $70 \text{ kg/m}^3$  ausgegangen. Die Bewehrung besteht zu 60 % aus B500A-Bewehrungsstahlmatten und zu 40 % aus B500A-Betonstabstahl. Die Wände werden aus Ortbeton hergestellt. Folglich sind vor der Betonage, die Schalungen der Außenwände aufzustellen. Der schematische Ablauf des Herstellungsprozesses ist in Abbildung 15 vereinfacht dargestellt.

Nach Erhärtung und entsprechendem Ausschalen der Betonaußenwände werden die Fenster und die Haustür eingebaut. Um den KfW-Effizienzhausstandard 55 gerecht zu werden, weisen die Fenster einen U-Wert von  $0,9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  auf.

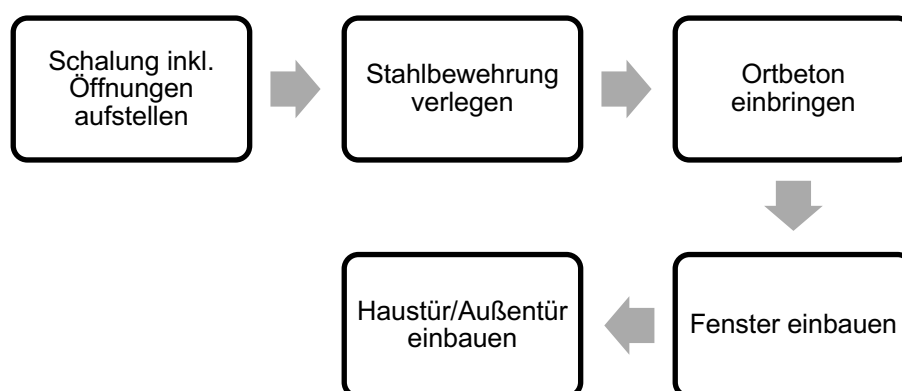


Abbildung 15 Herstellungsprozess Standardmodul tragende Außenwände der oberirdischen Geschosse, eigene Darstellung

#### 4.3.2.8 Tragende Innenstützen in allen Geschossen (Modulnummer 010)

Nach Goris (2018, S. 10.19) werden tragende Innenstützen aus Stahlbeton bei einer Flachdecke mittels Formel 3 berechnet:

$$h_{\text{Stütze}} \approx 1,1 h_{\text{Platte}}$$

##### Formel 3 Vorbemessung Stützen aus Stahlbeton

Wie bereits bei dem Standardmodul 004 berechnet, beträgt die Dicke der Flachdeckenplatte 0,25 m. Das Modell geht von einem quadratischen Stützenquerschnitt aus. Bei Anwendung der Formel 3 ergibt das eine Mindeststützendicke bzw. Mindestseitenlänge von 0,275 m.

Die Stützen haben einen Bewehrungsanteil von  $150 \text{ kg/m}^3$ , welcher gänzlich aus Betonstabstahl besteht. Zusätzlich werden Durchstanzbewehrungen, die statisch bei Stützen unter Flachdecken erforderlich sind, eingesetzt. Der verwendete Ortbeton weist die Betonfestigkeitsklasse C20/25 auf. Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 16 vereinfacht dargestellt.

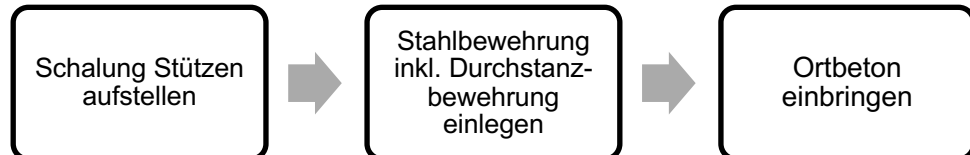


Abbildung 16 Herstellungsprozess Standardmodul Der tragenden Innenstützen in allen Geschossen, eigene Darstellung

#### 4.3.2.9 Außenwandbekleidungen der unterirdischen Geschosse (Modulnummer 011)

Das Modul beinhaltet sowohl Bauteile bzw. Bauleistungen an der Innenseite als auch an der Außenseite der unterirdischen Außenwand.

Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 17 vereinfacht dargestellt. Innenseitig werden ein 1 cm dicker Innenputz aus Kalkzement und ein Anstrich aus Wanddispersionsfarbe vorgesehen. Außenseitig werden die unterirdischen Außenwände zunächst mit einem Bitumenkleber versehen, auf der die Perimeterdämmung aus Schaumglas mit einer Stärke von 18 cm angebracht wird. Das Schaumglas als Perimeterdämmung wurde ausgewählt, weil diese Art der Dämmung bei Bodenfeuchte oder drückendem Grundwasser die Dämmeigenschaften beibehält. Zusammen mit der Außenwand aus WU-Beton besitzt der gewählte Querschnitt einen U-Wert von

0,22 W/(m<sup>2</sup>\*K) und entspricht somit der Anforderung an ein KfW-Effizienzhausstandard 55, bei dem der U-Wert maximal 0,25 W/(m<sup>2</sup>\*K) betragen darf.

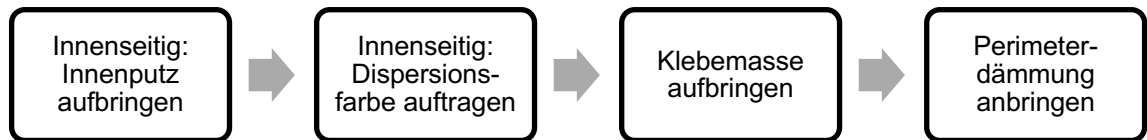


Abbildung 17 Herstellungsprozess Standardmodul Außenwandbekleidungen der unterirdischen Geschosse, eigene Darstellung

#### 4.3.2.10 Außenwandbekleidungen der oberirdischen Geschosse (Modulnummer 012)

Die Bekleidungen von Außenwänden haben grundsätzlich Anforderungen hinsichtlich Wärme-, Schall-, Brand- und Schlagregenschutz einzuhalten. Nach Hestermann und Rongen (2015, S. 287) gibt es drei Grundvarianten von Außenwandbekleidungen:

- „angemörtelte oder angemauerte Bekleidungen ohne Luftschichten,
- Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) mit Putzoberflächen und
- hinterlüftete Bekleidungen aus Stein, Holz, Metall oder auch Beton, keramischen Platten, Glas, Glasfaserbeton usw“

Für die Außenwandbekleidungen im Modell wird ein WDVS vorgesehen. Ein WDVS besteht im Allgemeinen aus den Schichten Wärmedämmung, Armierung und Außenputz, welche auf der Tragwand, in diesem Fall aus Beton, befestigt sind. WDVS müssen bauaufsichtlich zugelassen sein, was bedingt, dass ein bestimmtes System eines Herstellers in Gänze auszuführen ist, also alle Komponenten wie vorgesehen einzusetzen sind. Kombinationen von Systemen oder die Verwendung von Komponenten anderer Hersteller ist nicht zulässig. (Hestermann & Rongen, 2018, S. 834)

Als Dämmmaterial wird nichtbrennbare Mineralwolle mit einer Stärke von 20 cm ausgewählt, um zum einen den Brandschutzanforderungen der MBO und zum anderen den Anforderungen eines KfW-Effizienzhausstandards 55 gerecht zu werden. Für den gesamten Querschnitt inkl. tragender Außenwand ergibt sich ein U-Wert von 0,17 W/(m<sup>2</sup>\*K) und somit unter dem vorgegebenen U-Wert von 0,25 W/(m<sup>2</sup>\*K) liegt.

Bezüglich des Brandschutzes gemäß MBO sind bei Gebäuden bis 22 m Höhe Baustoffe mindestens der Klasse B1 (schwer entflammbar) zu verwenden. Durch den

ausschließlichen Einsatz von nichtbrennbarer Mineralwolle als Dämmstoff, wird diese Anforderung eingehalten und zusätzlich sind keine horizontalen und vertikalen Brandsperrern mehr vorzusehen. Die verputzte Oberfläche des WDVS gewährleistet den erforderlichen Schlagregenschutz gemäß DIN 18516.

Wie bei der Bekleidung der Außenwände der unterirdischen Geschosse sind innenseitig ein 1 cm dicker Innenputz aus Kalkzement und ein Anstrich mit Dispersionsfarbe vorgesehen.

In Abbildung 18 ist der Herstellungsprozess der Außenwandbekleidungen der oberirdischen Geschosse schematisch dargestellt.

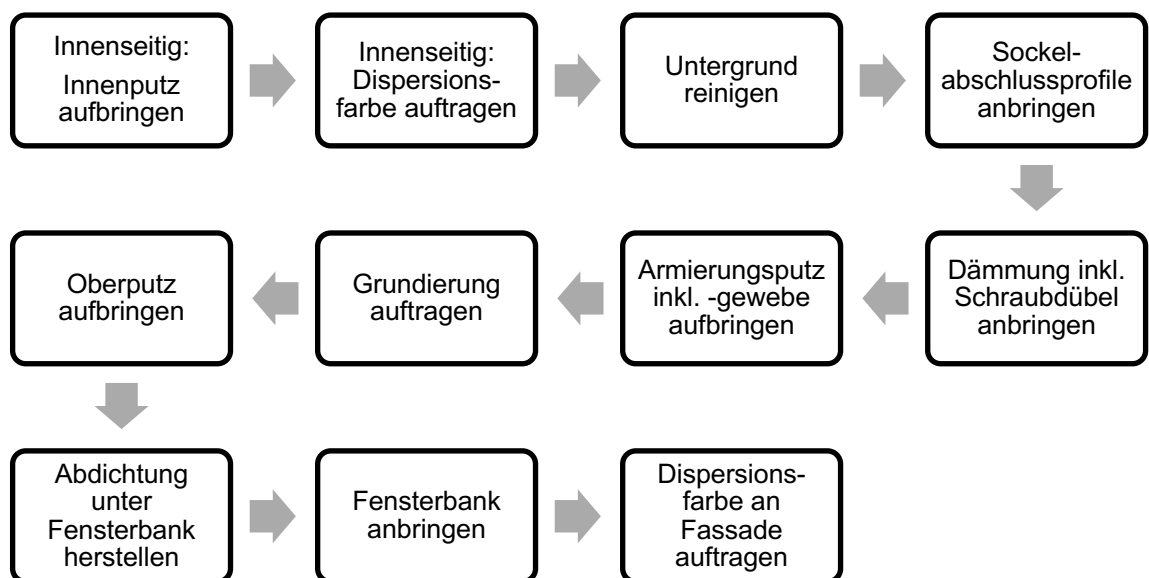


Abbildung 18 Herstellungsprozess Standardmodul Außenwandbekleidungen der oberirdischen Geschosse, eigene Darstellung

#### 4.3.2.11 Treppenhaus (Modulnummer 013)

Der im Modell gewählte Treppengrundriss ist eine zweiläufige gegenläufige Treppe mit Zwischenpodest wie in Abbildung 20 zu sehen. Dieser Treppengrundriss hat den Vorteil, dass die Wohnungszugänge über die Podeste erschlossen werden können und dadurch Flächen im Treppenhaus effizient genutzt werden (Hestermann & Rongen, 2018, S. 378).

Die baurechtlich notwendigen Treppen müssen gemäß DIN 18 065 eine nutzbare Treppenlaufbreite von mindestens 1,00 m aufweisen. Die Treppenlaufbreite wird im Modell mit 1,20 m festgelegt, sodass das Modul Treppenhaus theoretisch auch bei einer Büronutzung mit bis zu 200 Personen gemäß Arbeitsstättenrichtlinie A2.3 zum Einsatz

#### Modellentwicklung

kommen kann. Außerdem ist eine Steigung zwischen 140 mm bis 190 mm und ein Auftritt zwischen 260 mm bis 370 mm einzuhalten. Hestermann und Rongen (2018, S. 391) geben als optimales Maß der Steigung ein Verhältnis von 29 cm Auftritt zu 17 cm Steigung an, welches so im Modell umgesetzt wird. Mit den vorgenannten Parametern ergibt sich eine Grundfläche des Treppenhauses von 14,25 m<sup>2</sup> (Breite 2,50 m, Länge 5,70 m). Die Grundfläche des Moduls Treppenhaus ist eine feste Größe im Modell.

Gemäß MBO dient das Treppenhaus als erster Fluchtweg für jedes nicht ebenerdige Geschoss. Des Weiteren wird es den Brandschutzanforderungen der MBO gerecht, sofern im Treppenhaus ausschließlich nichtbrennbare Baustoffe verwendet werden bzw. alle brennbaren Materialien mit nichtbrennbarem Material abgedeckt bzw. verkapselt werden.

Das Treppenhaus des Modells wird aus Beton hergestellt, welcher die Qualität von Sichtbeton besitzt und keiner weiteren Bekleidung bedarf. Die Treppenhauswände werden aus Ortbeton hergestellt und die Treppenläufe und -podeste bestehen aus Betonfertigteilelementen. Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 19 vereinfacht dargestellt. Um die Schallschutzanforderungen gemäß MBO einzuhalten, werden Trittschalldämmelemente vorgesehen, die die Treppenläufe und -podeste schalltechnisch entkoppeln.

Außerdem wird ein innenseitig verlaufendes Treppengeländer vorgesehen, um Abstürze zu verhindern.

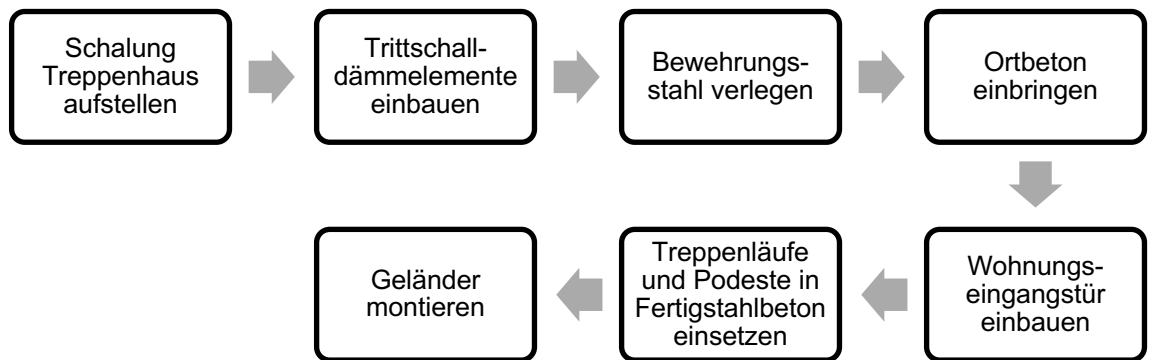


Abbildung 19 Herstellungsprozess Standardmodul Treppenhaus, eigene Darstellung

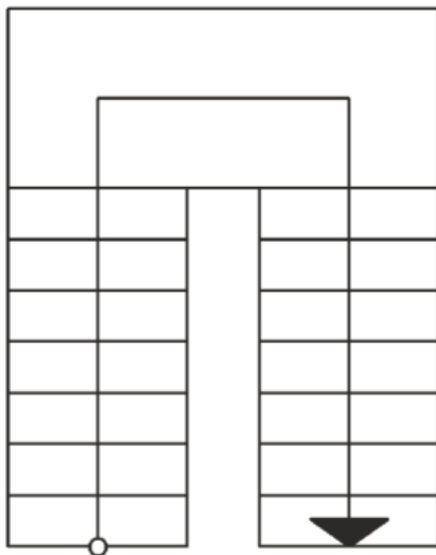


Abbildung 20 Schematischer Treppengrundriss, (Hestermann & Rongen, 2018, S. 378)



### **4.3.3. Standardmodule des nicht-technischen Ausbaus**

Die Module des Ausbaus enthalten die Bauteile und Bauleistungen bezüglich Deckenbeläge, Deckenbekleidungen und Innenwandwandbekleidungen.

#### **4.3.3.1 Ausbau der Aufenthalts- und Küchenräume (Modulnummer 101)**

Die Aufenthalts- und Küchenräume weisen im Modell den gleichen Ausbaustandard auf. Die Flächen der Aufenthaltsräume sind im Modell variabel und ergeben sich aus den Eingabeparametern. Die Methodik der Berechnung der Aufenthaltsraumflächen ist in Abschnitt 4.2.4 beschrieben. Dahingegen stellen die Flächen der Küchenräume eine Konstante des Modells dar. Jede Wohneinheit besitzt einen Küchenraum mit einer Fläche von 10 m<sup>2</sup>.

Der Aufbau der Geschossdecken inkl. Beläge und Bekleidungen erfüllen den Standard einer Wohnungstrenndecke. Bei diesem Standardmodul wird ein Regelquerschnitt von Hestermann und Rongen (2015, S. 447) zugrunde gelegt, welcher in Abbildung 21 schematisch dargestellt ist. Hierbei ist unterhalb der tragenden Geschossdecke ein Putz aufgetragen. Oberhalb der Geschossdecke besteht der Aufbau (von unten nach oben) aus einer 30 mm dicken Trittschalldämmung aus PS-Hartschaum, einer einlagigen Abdeckfolie, einem Estrich und einem beliebigen Bodenbelag. Weiter wird für das Modul definiert, dass der Estrich schwimmend verlegt wird und eine Dicke von 5 cm aufweist. Nach Aussage von Hestermann und Rongen (2015, S. 438) ist schwimmender Estrich am wirksamsten zur weiteren Verbesserung des Trittschallschutzes. Als Bodenbelag wird ein einfacher PVC-Belag gewählt. Der schematische Herstellungsprozess der Deckenbeläge ist in Abbildung 22 und der Deckenbekleidungen in Abbildung 23 vereinfacht dargestellt.

Hestermann und Rongen (2015, S. 452) geben als Mindeststärke der Trittschalldämmung eine Dicke von 15 mm an, um die Anforderungen an den Trittschallschutz gemäß DIN 4109 einzuhalten. Daneben weisen Hestermann und Rongen (2015, S. 432) darauf hin, dass die Mindestanforderungen der DIN 4109 nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen und höhere Anforderungen anzusetzen sind. So wird eine Trittschalldämmstärke von 30 mm angesetzt.

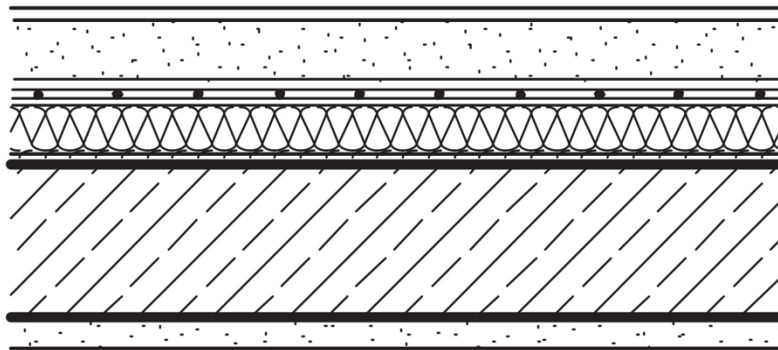


Abbildung 21 Regelquerschnitt Decken der Aufenthalts- und Küchenräume sowie Wohnungseingangsbereiche, (Hestermann & Rongen, 2015, S. 447)

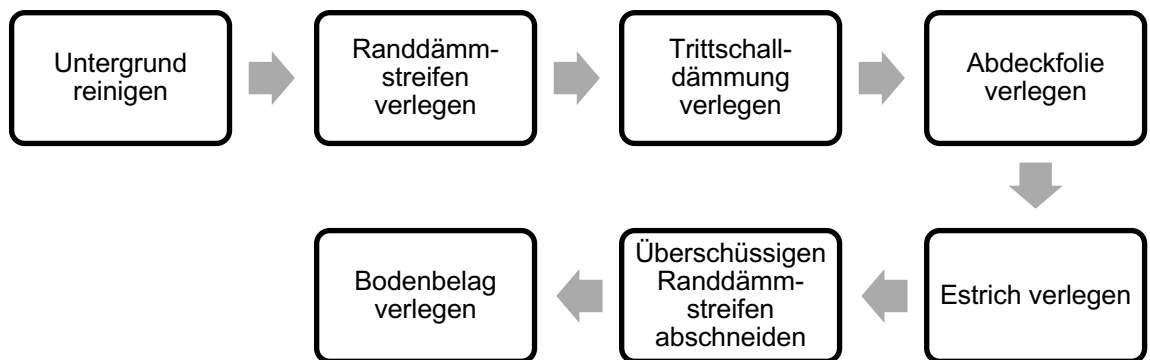


Abbildung 22 Herstellungsprozess Standardmodul Aufenthalts- und Küchenräume sowie Wohnungseingangsbereiche - Deckenbeläge, eigene Darstellung

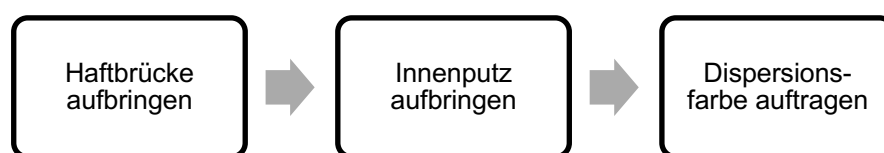


Abbildung 23 Herstellungsprozess Standardmodul Aufenthalts- und Küchenräume, Nassräume sowie Wohnungseingangsbereiche - Deckenbekleidungen, eigene Darstellung

Die Innenwände dienen dem Zweck der Abtrennung der Wohneinheiten sowie der Raumteilung innerhalb der Wohnungen, weshalb alle Innenwände zur Vereinfachung des Modells den gleichen Standard aufweisen. Die Innenwände erfüllen die Anforderungen an Wohnungstrennwände hinsichtlich des Schall- und Wärmeschutzes. Die Innenwände sind kein Teil der tragenden Baukonstruktion und müssen ausschließlich ihr Eigengewicht tragen.

Bei der Standardbauweise wird ein Mauerwerk aus Kalksandstein mit einer Dicke von 24 cm und einer Rohdichte von  $2 \text{ kg/m}^3$  vorgesehen. Auf das Mauerwerk kommt ein

#### Modellentwicklung

1 cm dicker Innenputz aus Kalkzement und wird anschließend mit einer Dispersionsfarbe beschichtet. Der Innenwandaufbau erreicht nach dem Bauteilkatalog der DIN 4109-31-36:2016-07 ein theoretisches Direktschalldämmmaß von 60,3 dB. Mindestens einzuhalten, ist bei Wohnungstrennwänden gemäß DIN 4109:2016 ein Direktschalldämmmaß von 53 dB.

Für jeden Aufenthalts- und Küchenraum wird eine Innentür, die aus Holzwerkstoff besteht, angenommen. Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 24 vereinfacht dargestellt.

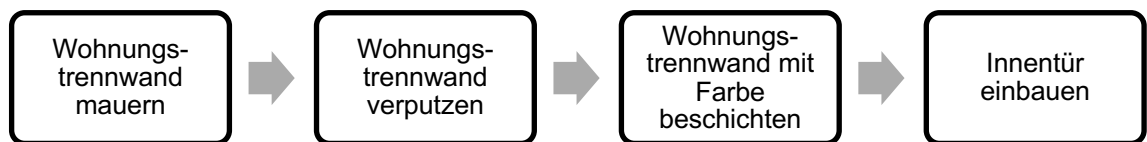


Abbildung 24 Herstellungsprozess Standardmodul Aufenthalts- und Küchenräume sowie Wohnungseingangsbereiche - Innenwände und Innenwandbekleidungen, eigene Darstellung

#### 4.3.3.2 Ausbau der Nassräume (Modulnummer 102)

Gemäß der zurückgezogenen Begriffsnorm DIN 18195-1 ist ein „Nassraum ein Innenraum, in dem nutzungsbedingt Wasser in solcher Menge anfällt, dass zu seiner Ableitung eine Fußbodenentwässerung erforderlich ist“. Hestermann und Rongen (2015, S. 422) geben an, dass Wohnbäder mit niveaugleichen Duschen oder Duschwannen mit Bodenabläufen zu Nassräumen zählen. Im Modell wird davon ausgegangen, dass die Duschen über Bodenabläufe verfügen und deshalb die Anforderungen an ein Nassraum erfüllt werden müssen. Bei Nassräumen ist insbesondere die Abdichtung gegen Wasser zu gewährleisten. Um dies zu erreichen, wird im Modell eine Verbundabdichtung mit keramischen Fliesen wie in Abbildung 25 vorgesehen.

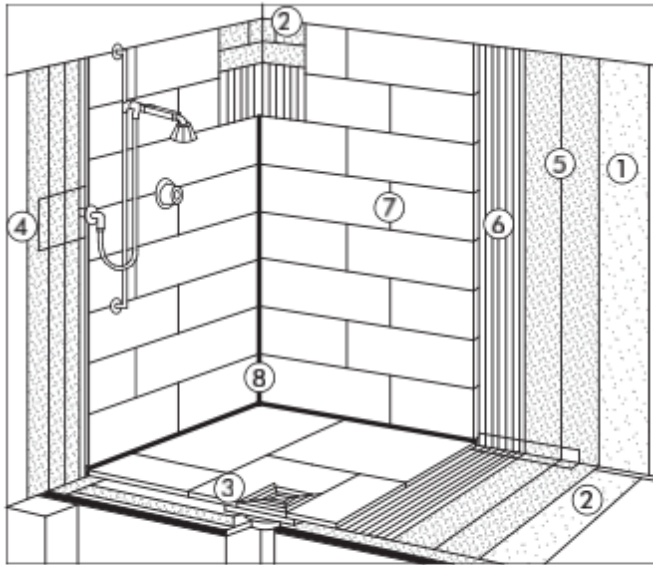


Abbildung 25 Aufbau Verbundabdichtung mit keramischen Fliesen in Nassräumen, (Hestermann & Rongen, 2015, S. 427)

Der Aufbau der Innenwände entspricht grundsätzlich dem Aufbau der anderen Ausbaumodule. Bei den Wänden und Böden der Nassräume kommt zusätzlich eine zweilagige Abdichtung aus Polymerdispersion hinzu. Außerdem werden anstatt des Innenputzes trockengepresste Fliesen mittels Dünnbettverfahren nach DIN 18157-1:2017-04 (DIN e.V., 2017) an den Wänden und auf den Böden verlegt sowie mit Fugenfüllmaterial im Schlämmverfahren wasserabweisend verfugt. Die Randfugen werden mit dauerelastischem Fugendichtstoff verschlossen. Die Herstellungsprozesse der Nassraumwände und -böden sind vereinfacht in der Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt.

Weiter werden bei den Nassräumen spezielle Nassraumtüren eingebaut, die unter Feuchtigkeitsbeanspruchung eine höhere Dauerhaftigkeit als die Innentüren der Aufenthaltsräume aufweisen.

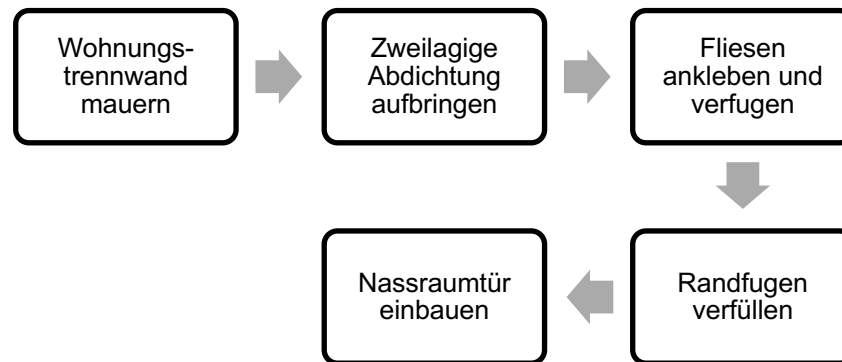


Abbildung 26 Herstellungsprozess Standardmodul Nassräume - Innenwände und Innenwandbekleidungen, eigene Darstellung

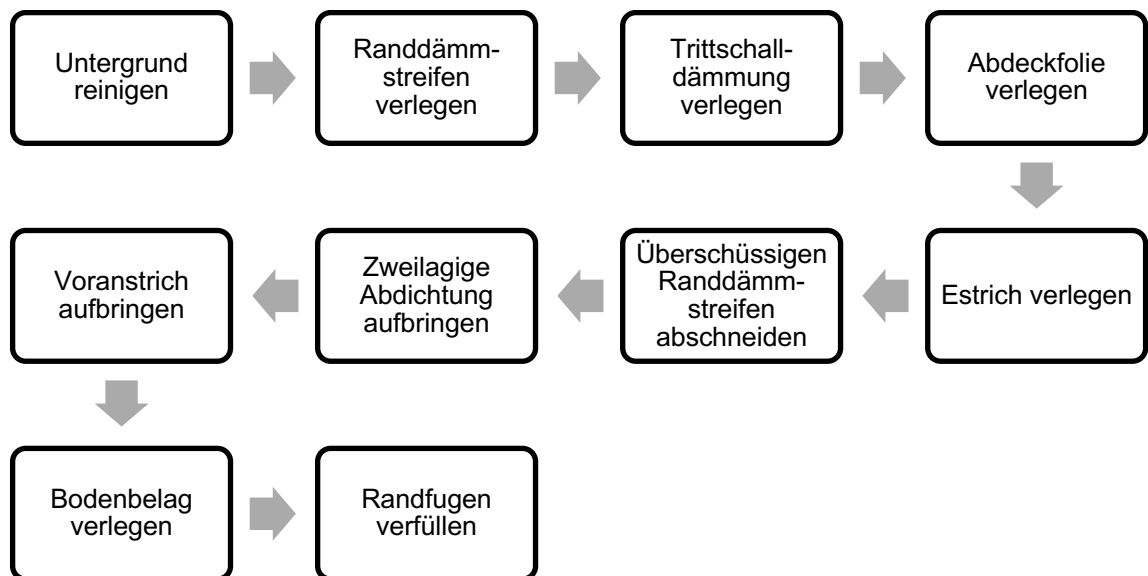


Abbildung 27 Herstellungsprozess Standardmodul Nassräume - Bodenbeläge, eigene Darstellung

#### 4.3.3.3 Ausbau der Wohnungseingangsbereiche/Flure (Modulnummer 103)

Der Aufbau der Innenwände, Deckenbeläge und -bekleidungen des Moduls 103 entspricht dem Aufbau des Moduls 101. Die Berücksichtigung als separates Modul dient einer späteren Erweiterung des Modells bzw. soll die Möglichkeit bieten, spezifische Änderungen/Anpassungen an diesem Modul vorzunehmen.

Die Fläche der Wohnungseingangsbereiche ist eine Variable des Modells und richtet sich nach den Eingabeparametern, die bei der Anwendung anzugeben sind. Die genaue Berechnung der Wohnungseingangsbereichsflächen ist in Abschnitt 4.2.4 beschrieben.

#### **4.3.4. Alternativmodule**

Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Module stellen Alternativen zu den Standardmodulen dar, welche in den vorherigen Abschnitten 4.3.2.2, 4.3.2.3, 4.3.2.4, 4.3.2.7, 4.3.2.8, 4.3.2.10 4.3.3.1 beschrieben sind. An die folgenden Alternativmodule werden die gleichen Anforderungen wie an die Standardmodule gestellt.

Für den konstruktiven Holzbau mit Brettsperrholz (BSP) konnte der Autor keine Vorbemessungsformeln aus der Standardliteratur wie Frick/Knöll Baukonstruktionslehre, Neufert Entwurfslehre oder den Schneider Bautabellen entnehmen. Um keine vagen Annahmen treffen zu müssen, wird als Grundlage des Modells auf die Vorbemessungstabellen des Herstellers KLH Massivholz GmbH zurückgegriffen. Die KLH Massivholz GmbH (2020, S. 2) gibt an, dass die Vorbemessungstabellen auf Basis des Eurocodes 5 entwickelt wurden und dadurch der deutschen Normung gerecht werden. Ein statischer Nachweis wird dadurch selbstverständlich nicht ersetzt, soll aber für die hier durchgeführte Modellentwicklung ausreichen.

Um aus statischer Sicht auf der sicheren Seite zu liegen, werden die konservativsten Annahmen getroffen. Hierdurch wird zudem vermieden, dass zu geringe Annahmen bei den Alternativmodulen fälschlicherweise zu besseren Ergebnissen hinsichtlich Lebenszykluskosten, Verbrauch von grauer Energie sowie fossilen Treibhausgasen führen. Auf diese Weise wird ein objektiver Vergleich der Holzbauweise und der Standardbauweise gewährleistet.

##### **4.3.4.1 Alternative Geschossdecken (Modulnummer 004a)**

Das Alternativmodul der tragenden Geschossdecken besteht aus Nadelholz, welches zu BSP verarbeitet wurde. Angenommen wird ein Einfeldträger mit einer Spannweite von 5 m, einer ständigen Auflast von  $3 \text{ kN/m}^2$  und einer Nutzlast von  $5 \text{ kN/m}^2$  (maximal angegebene Lastwerte). Mit den angesetzten Lasten kann dieses Alternativmodul aus statischer Sicht bei Wohn-, Büro- und Versammlungsnutzungen zum Einsatz kommen (KLH Massivholz GmbH, 2020)

Gemäß den Vorbemessungstabellen von KLH Massivholz GmbH (2020, S. 12) ist bei den vorgenannten Parametern eine fünfplagige Brettsperrholzplatte mit einer Stärke von 200 mm notwendig. Diese Plattenstärke behält bei Brandbeanspruchung die Tragfähigkeit für mindestens 120 min und übererfüllt somit die Brandschutzanforderung der MBO. Außerdem wird der Schwingungsnachweis für erhöhte Anforderungen in Kombination

#### **Modellentwicklung**

mit einem Nassestrich, wie in den Ausbaumodulen angesetzt, eingehalten. Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 28 vereinfacht dargestellt.

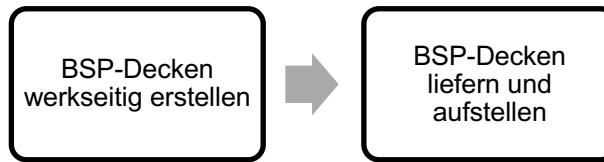


Abbildung 28 Herstellungsprozess Alternativmodul Geschossdecken, eigene Darstellung

#### 4.3.4.2 Alternative Dachgeschossdecke (Modulnummer 005a)

Zur Vereinfachung des Modells wird der gleiche Aufbau der alternativen Dachgeschossdecke wie bei den Geschossdecken angesetzt, da bei diesem Modul die konservativsten Annahmen berücksichtigt werden. Analog zum Standardmodul 005 wird ein Flachdachausstieg berücksichtigt. Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 29 vereinfacht dargestellt.

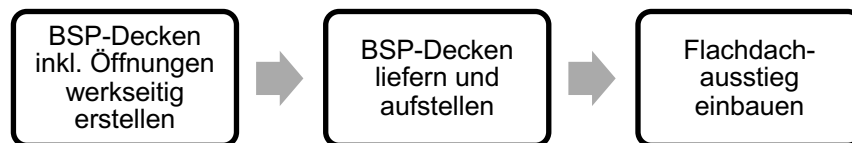


Abbildung 29 Herstellungsprozess Alternativmodul Dachgeschossdecke, eigene Darstellung

#### 4.3.4.3 Alternative Attika (Modulnummer 006a)

Das Alternativmodul der Attika ist eine Holzrahmenkonstruktion, die aus Konstruktionsvollholz (KVH) hergestellt wird. Die Zwischenräume des Rahmens werden mit nicht-brennbarer Mineralwolle gefüllt. Um die Brandschutzanforderungen der MBO zu erfüllen, wird die Holzrahmenkonstruktion mit 18 mm starken Feuerschutzgipsplatten (Typ DF) zweilagig von beiden Seiten beplankt. Wie bei dem Standardmodul 006 wird auf dieser Konstruktion ein gekantetes Attikaabdeckungsprofil aus Titanzink montiert. Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 30 vereinfacht dargestellt.

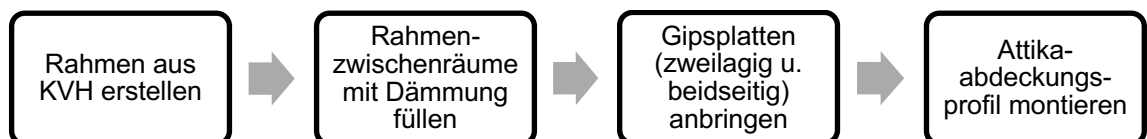


Abbildung 30 Herstellungsprozess Alternativmodul Attika, eigene Darstellung

#### 4.3.4.4 Alternative tragende Außenwände der oberirdischen Geschosse (Modulnummer 009a)

Wie die Geschossdecken besteht das Modul der tragenden Außenwände der oberirdischen Geschosse aus BSP. Auch hier wurden die Vorbemessungstabellen der KLH Massivholz GmbH (2020) zugrunde gelegt und die konservativsten Lastannahmen berücksichtigt. Weiter wird eine Beplankung mit Feuerschutzgipsplatten vorgesehen. So wurde eine fünfschichtige BSP-Platte mit einer Stärke von 120 mm ausgewählt. Unter Brandbeanspruchung behalten die Außenwände mindestens 120 min die Tragfähigkeit.

In diesem Modul sind des Weiteren die Fenster und die Hauseingangstür enthalten. Im Gegensatz zu dem Standardmodul 009 sind die Blend- und Flügelrahmen der Fenster aus Nadelholz. Die Verglasung ist dieselbe und insgesamt weisen die Fenster einen U-Wert von  $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  auf. Die hier gewählte Außentür unterscheidet sich nicht zu dem Standardmodul. Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 31 vereinfacht dargestellt.

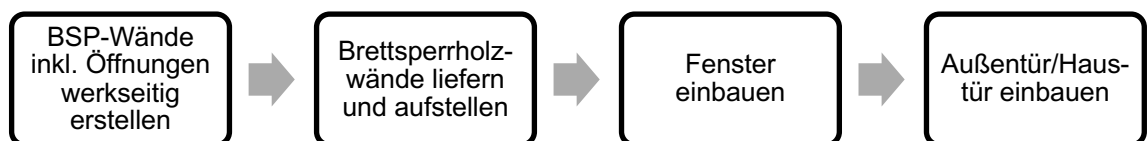


Abbildung 31 Herstellungsprozess Alternativmodul Außenwände der oberirdischen Geschosse, eigene Darstellung

#### 4.3.4.5 Alternative tragende Innenstützen in allen Geschossen (Modulnummer 010a)

Die tragenden Innenstützen des Alternativmoduls sind aus Brettschichtholz (BSH). Die zuvor angewendeten Vorbemessungstabellen bieten keine Werte zur Vorbemessung von Holzstützen an. Für das Modell wird ein quadratischer Querschnitt mit einer Seitenlänge von 16 cm angenommen. Die Stützen sind somit 33 % dicker als die Außenwände des Alternativmoduls 009a. So geht der Autor davon aus, dass die Mindestanforderungen an die Statik und den Brandschutz ausreichend erfüllt sind. Die BSH-Stützen werden an den Fuß- und Kopfpunkten mittels Stahlverbindungen an die Decken angeschlossen. Für eine brandschutzgerechte Ausführung gemäß MBO werden die BSH-Stützen zweilagig mit 18 mm dicken Feuerschutzgipsplatten beplankt bzw. verkapselt. Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 32 vereinfacht dargestellt.



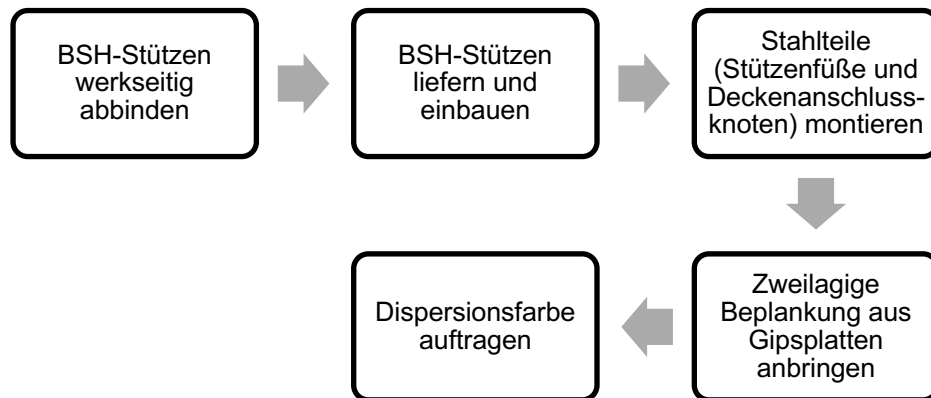


Abbildung 32 Herstellungsprozess Alternativmodul tragende Innenstützen, eigene Darstellung

#### 4.3.4.6 *Alternative Außenwandbekleidungen der oberirdischen Geschosse (Modulnummer 012a)*

Gegenüber dem Standardmodul 012 besitzt dieses Alternativmodul denselben Aufbau und erhält noch zusätzliche Bauteilschichten. Der Aufbau orientiert sich an den Regelquerschnitt für Massivholzwände mit WDVS von Kaufmann et al. (2017, S. 102). Wie in Abbildung 33 zu sehen, wird innenseitig der Außenwand aus Gründen des Brandschutzes eine zweilagige Wandbekleidung aus 18 mm dicken Feuerschutzgipsplatten vorgesehen. Die Installationsschicht wird nicht berücksichtigt. Auf der Außenseite der Außenwand kommt vor dem Aufbau des WDVS eine Luftdichtheitsschicht aus Polyethylen-Folie und eine Beplankung aus einer 12,5 mm dicken Feuerschutzgipsplatte. Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 34 vereinfacht dargestellt.

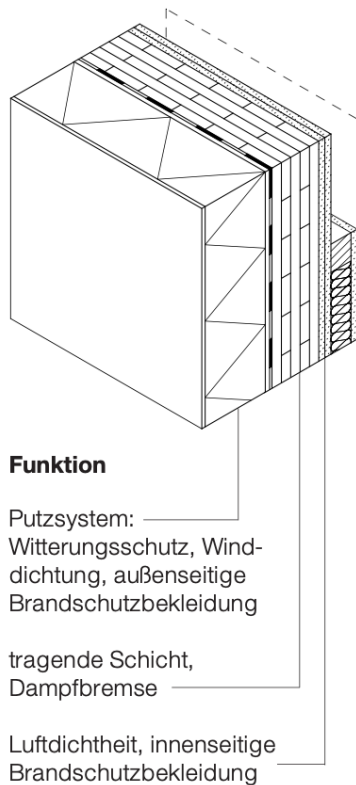


Abbildung 33 Regelquerschnitt Massivholzwände mit WDVS, (Kaufmann et al., 2017, S. 102)

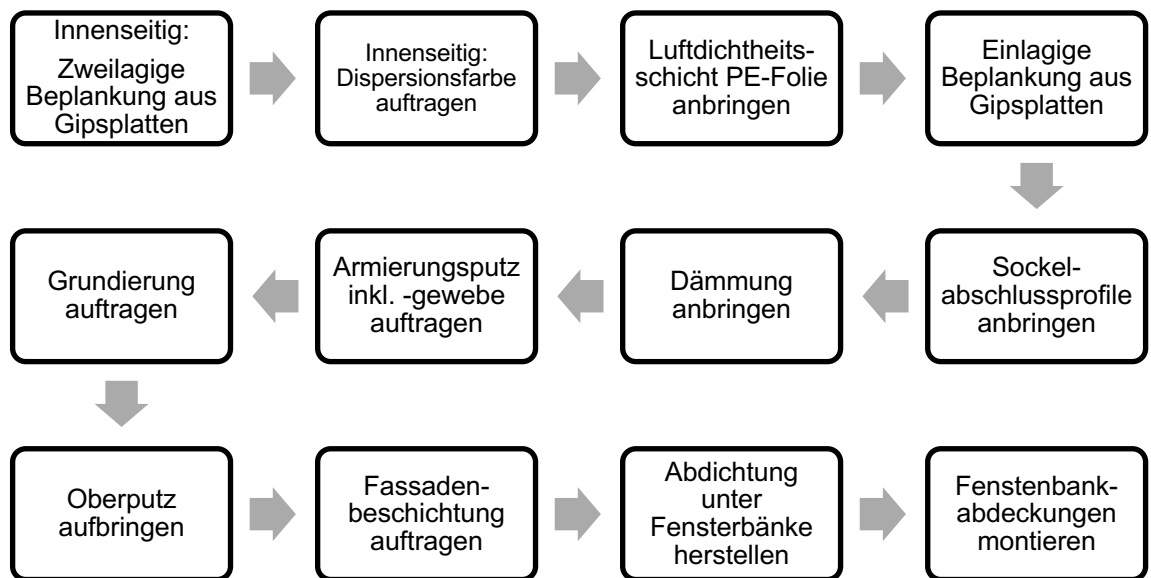


Abbildung 34 Herstellungsprozess Alternativmodul Außenwandbekleidungen der oberirdischen Geschosse, eigene Darstellung

#### 4.3.4.7 Alternativer Ausbau der Aufenthalts- und Küchenräume (Modulnummer 101a)

Als Alternative zum Mauerwerk aus Kalksandstein im Standardmodul 101 wird ein Innenwandaufbau von der Website dataholz.eu herangezogen. Die Website enthält Bauteile und Regelquerschnitte, die eine bauaufsichtliche Zulassung erhalten haben. Der für das Modell gewählte Aufbau besitzt die Kennzeichnung *iwrxxo10b-00* und ist in Abbildung 35 dargestellt. Wie beim Standardmodul 101 handelt es sich auch hierbei um eine nichttragende Innenwand, die ausschließlich dem Eigengewicht standhalten muss. Die Schichten A und F bestehen jeweils aus zwei Lagen 18 mm dicken Feuerschutzgipsplatten, gefolgt von den weiter innen liegenden Schichten B und E, die aus 22 mm starken Grobspanplatten bestehen. Der Innenwandkern ist ein mit Mineralwolle gefüllter Rahmen aus KVH. Der Kern weist eine Stärke von 120 mm auf. Insgesamt erreicht dieser Aufbau die Brandschutzklasse REI 90. Folglich behält dieser bei Brandbeanspruchung für mindestens 90 min die raumabschließende Wirkung, die Tragfähigkeit sowie die Wärmedämmeigenschaften. (Holzforschung Austria, 2022) Zuletzt werden die Innenwände mit Dispersionsfarbe beschichtet und mit Innentüren versehen. Der schematische Herstellungsprozess der alternativen Innenwand ist in Abbildung 36 vereinfacht dargestellt.

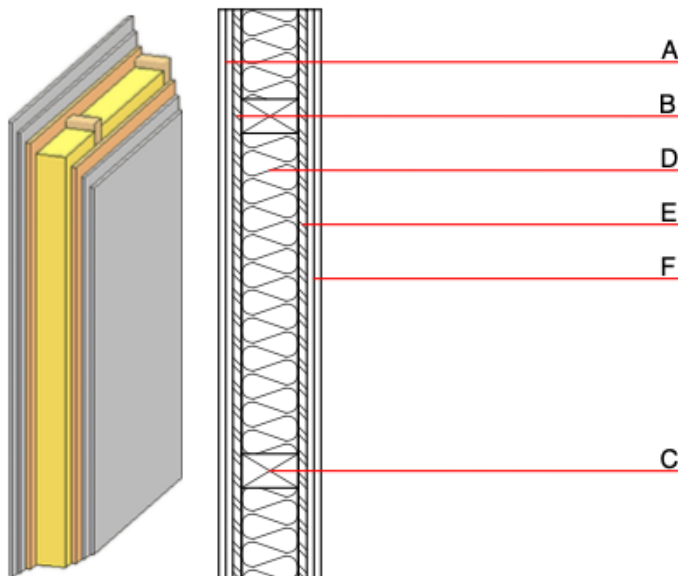


Abbildung 35 Bauteilaufbau Alternative Innenwand, (Holzforschung Austria, 2022)

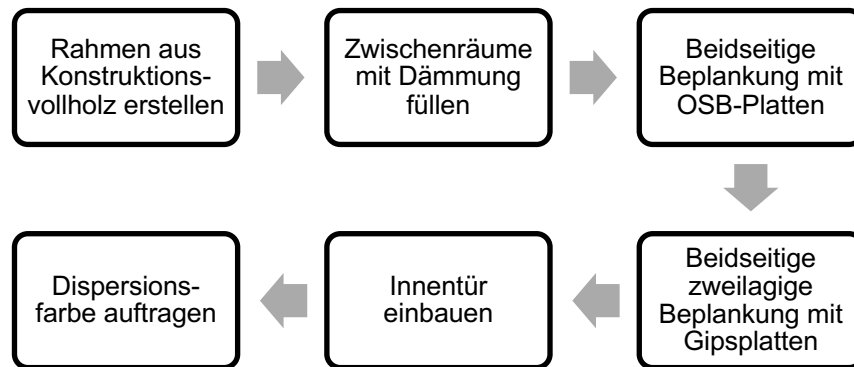


Abbildung 36 Herstellungsprozess Alternativmodul Aufenthalts- und Küchenräume - Innenwände, eigene Darstellung

Der Bodenaufbau weist im Vergleich zum Standardmodul 101 in den unteren Lagen Unterschiede auf. So ist aus schallschutztechnischen Gründen eine Schüttung aus Mineralstoff sowie ein Rieselschutz notwendig. Denn je höher das Flächengewicht einer Decke, desto höher die Trittschalldämmwirkung. Die Mineralstoffschüttung wird mit einer Stärke von 120 mm ausgeführt und ist elastisch gebunden. Auf dieser Schicht folgt eine 40 mm Trittschalldämmung aus Mineralwolle. Die weiteren Schichten gleichen denen des Standardmoduls 101. Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 37 vereinfacht dargestellt.

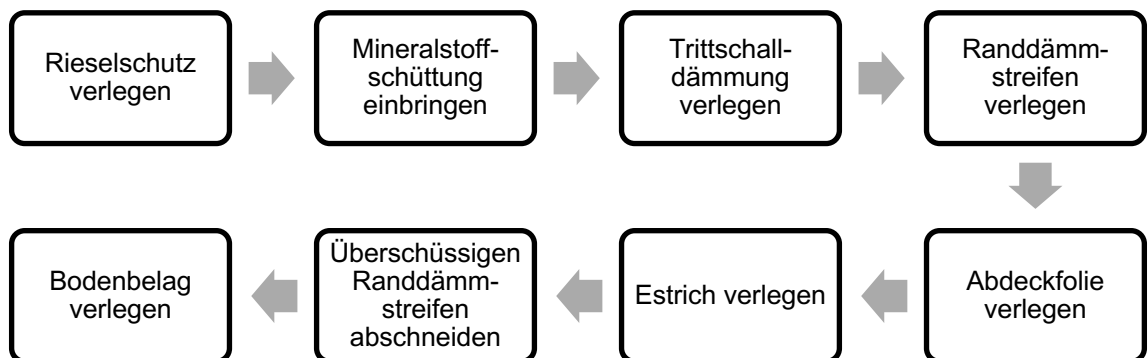


Abbildung 37 Herstellungsprozess Alternativmodul Aufenthalts- und Küchenräume - Böden, eigene Darstellung

Bei der Herstellung des Innenputzes an der Decke ist bei Holzuntergründen ein Putzträger, anstelle einer flüssigen Haftgrundierung heranzuziehen. Der hier gewählte Putzträger ist aus Rippenstreckstahl. Die weiteren Arbeiten unterscheiden sich nicht zum Standardmodul 101. Der schematische Herstellungsprozess ist in Abbildung 38 vereinfacht dargestellt.

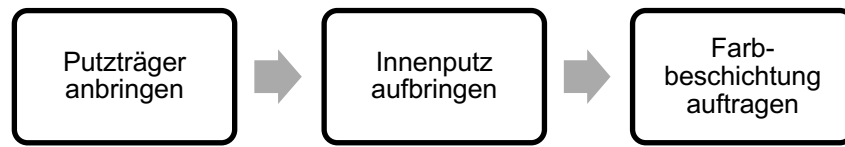


Abbildung 38 Herstellungsprozess Alternativmodul Aufenthalts- und Küchenräume - Decken, eigene Darstellung

## 4.4. Verknüpfung des Modells mit Kennwerten

### 4.4.1. Nutzungsdauern von Bauteilen

Als Grundlage der Nutzungsdauern von Bauteilen wird die Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB“ vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) verwendet. Diese Tabelle ist bei einer Gebäudezertifizierung bzw. Ökobilanzierung nach dem BNB verpflichtend zu berücksichtigen. Das BNB ist in erster Linie für öffentliche Bauten des Bundes entwickelt worden.

Die Tabelle der Bauteilnutzungsdauern des BSSR gibt Auskunft über den Austauschzyklus von Bauteilen in den ersten 50 Jahren. Die Angaben beruhen auf Erfahrungswerten einer Expertengruppe sowie Literaturangaben. Weiter handelt es sich um mittlere Nutzungsdauern. Die Werte berücksichtigen neben den technischen Lebensdauern auch gesetzlich erforderliche sowie ästhetisch bedingte Aspekte. (BBSR, 2022)

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Modell nimmt an, dass Bauteile nach der vorgegebenen Lebensdauer gemäß der Tabelle des BBSR ausgetauscht werden. Lebensdauererweiternde Instandsetzungsmaßnahmen oder ein Teilaustausch sind nicht vorgesehen. Mit Instandsetzung ist innerhalb dieser Arbeit daher Ersatzinstandsetzung oder auch Austausch gemeint.

Bauteile, die in der BNB-Tabelle mit einer Lebensdauer von mehr als 50 Jahren ( $\geq 50$ ) angegeben sind, werden im Modell theoretisch als unendlich funktionsfähig angesehen und werden somit während der Nutzungsdauer des Gebäudes nie ausgetauscht.

Besteht ein Bauteil aus mehreren Teilen bzw. Schichten, die nicht trennbar oder nur mit sehr hohem Aufwand zu trennen sind, so ist die kürzeste Lebensdauer eines Teils bzw. einer Schicht für den Austausch des ganzen Bauteils maßgebend. So gibt es auch der SIA in dem Merkblatt 2032 vor (Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, 2010). Beispielsweise ist gemäß der BNB-Tabelle die Lebensdauer eines Fensterrahmens (Flügel- und Blendrahmen) aus Kunststoff mit 40 Jahren angegeben. Die Lebensdauer einer Zwei-Scheiben-Isolierverglasung mit 30 Jahren. Entsprechend der gängigen Praxis wird ein Fenster in der gängigen Praxis als Ganzes ausgetauscht, da der Aufwand und die damit verbundenen Kosten höher sind als Austausch einzelner Teile. So geht das Modell von einer Ersatzinstandsetzung des ganzen Fensters nach 30 Jahren Nutzung aus und würde dies in einem 30-Jahreszyklus wiederholen.

### **Modellentwicklung**

#### **4.4.2. Baupreise**

Zur Berechnung der Lebenszykluskosten werden die Einheitspreise für Bauleistungen von der kommerziell betriebenen Datenbank von Baupreislexikon.de verwendet. Die dort hinterlegten Kostendaten unterliegen einer monatlichen Aktualisierung und werden stetig durch weitere Bauleistungen ergänzt. Nach eigenen Angaben besitzt die Datenbank die Baupreise für mehr als eine Millionen Bauleistungen. Um den Baupreis zu bestimmen, nennt der Anbieter f:data GmbH folgende Faktoren:

- Qualifikation des für eine bestimmte Leistung benötigten Personals
- Löhne
- Gerätekosten
- Zuschläge (z. B. für Baustellengemeinkosten, allgemeine Geschäftskosten), Produktivität, Materialkosten, Marktlage und optional Kosten für Baustelleneinrichtung

Die anhand der zuvor genannten Faktoren errechneten Baupreise beruhen folglich nicht auf nachträglichen Auswertungen von bereits entstandenen Kosten (Ist-Kosten). Mit den Ist-Kosten erfolgt lediglich eine Validierung der errechneten Baupreise. (f:data GmbH, 2022)

Zu jedem Bauteil bzw. jeder Bauleistung im Modell liegt ein Einheitspreis für die Herstellung sowie den Abbruch inkl. der Verwertung vor. Der entsprechende Einheitspreis multipliziert mit der ermittelten Menge des jeweiligen Bauteils bzw. der jeweiligen Bauleistung ergibt die Gesamtkosten je Bauteil bzw. -leistung. Ist innerhalb der Gesamtnutzungsdauer des Gebäudes gemäß den BNB-Vorgaben eine Ersatzinstandsetzung von Bauteilen vorgesehen, so berücksichtigt das Modell die Kosten des Abbruchs inkl. der Verwertung sowie die Kosten für eine erneute Herstellung des Bauteils. Durch die Summierung der Kosten für Herstellung, Instandsetzungen sowie Abbruch inkl. der Verwertung werden die Lebenszykluskosten, die im Zusammenhang eines Bauteils stehen, ermittelt.

Auf Ebene der Abbruch- und Entsorgungsleistungen werden ausschließlich die damit verbundenen Kosten berechnet. Es findet also keine Berechnung der Ökobilanzwerte statt (Verweis auf Abschnitt 4.4.3). Die Kosten der Herstellung und der

#### **Modellentwicklung**

Instandsetzungen werden auf Ebene der Herstellungsleistungen ermittelt. Um die jeweiligen Kosten unterscheiden zu können, werden die jeweiligen Kosten den übergeordneten Lebenszyklusphasen Herstellung- und Bauphase (Phase A), Nutzungsphase (Phase B) und Entsorgungsphase (Phase C) zugeordnet. So sind die Herstellungskosten der Phase A, die Instandsetzungskosten der Phase B und die Kosten für Abbruch und Verwertung der Phase C zugeordnet.

Die im Modell hinterlegten Baupreise wurden in dem Zeitraum zwischen Oktober 2021 und Januar 2022 von der Datenbank entnommen. Außerdem handelt es sich bei den berücksichtigten Preisen und ermittelten Kosten um Nettoangaben.

#### **4.4.3. Ökobilanzwerte zur grauen Energie und zu fossilen Treibhausgasemissionen**

Auf Ebene der Bauteile bzw. -leistungen werden die Ökobilanzwerte zur grauen Energie und zu den fossilen Treibhausgasemissionen mit dem Modell verknüpft. Die Daten haben ihren Ursprung in der Ökobilanzierungsdatenbank ÖKOBAUDAT in ihrer aktuell gültigen Version 2021-II. Diese wurde am 25.06.2021 veröffentlicht und steht kostenlos im Internet zur Verfügung (BBSR, 2021b).

Die ÖKOBAUDAT ist eine Datenbank, die ausschließlich EPDs und Bilanzdaten zu Prozessen des Bauwesens enthält. Sie basiert auf der Datenbank des größten Ökobilanzdatenbankanbieters GaBi (Abkürzung für Ganzheitliches Bauen). Ein weiterer Vorteil dieser Datenbank ist, dass die Ökobilanzdatensätze mindestens einmal jährlich aktualisiert werden. Weiter verfügt die ÖKOBAUDAT über Ökobilanzdatensätze, die der aktuellen Norm EN 18504+A2 entsprechen. Die EN 18504+A2 (Europäische Normbezeichnung) wurde im März 2020 veröffentlicht und wird die EN 15804+A1 ersetzen. Bei Nachhaltigkeitsbewertungen gemäß BNB ist zukünftig<sup>1</sup> vorgesehen, dass ausschließlich Ökobilanzdaten der neuen Norm entsprechend zu verwenden sind. Eine Verwendung von Daten nach neuer Norm zusammen mit Daten nach alter Norm ist nicht zulässig, da mit der neuen Norm zum einen neue Wirkungsindikatoren eingeführt wurden und zum anderen neue Berechnungsmethoden zugrunde liegen. In dem Modell werden ausschließlich Ökobilanzdaten, die mit der EN 18504+A2 konform sind, verwendet. So ist in dem Modell sichergestellt, dass alle verwendeten Ökobilanzdaten unter

---

<sup>1</sup> Zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit (06.02.2022) stand noch kein Termin fest, ab dem die EN 18504+A2 im Rahmen des BNB verbindlich zu verwenden ist.



Berücksichtigung derselben Systematik bezüglich Systemgrenzen und Annahmen erstellt wurden. (BBSR, 2021a; DIN e.V., 2020)

Außerdem werden grundsätzlich generische Datensätze bzw. generische EPDs aus der ÖKOBAUDAT dem Modell zugrunde gelegt. Wenn keine generischen Datensätze verfügbar sind, wird auf repräsentative, durchschnittliche oder hersteller-spezifische Datensätze zurückgegriffen. Die Übersicht der verwendeten Datensätze ist dem Anhang B zu entnehmen. In der Tabelle 6 sind die Bauteile bzw. -leistungen aufgelistet, zu denen die ÖKOBAUDAT keine Datensätze bereitstellt und deshalb im Modell bei der Bilanzierung der grauen Energie und den fossilen Treibhausgasemissionen nicht berücksichtigt werden.

<b>Betroffenes Modulnummer</b>	<b>Bauteile/-leistungen ohne Ökobilanzdaten in der ÖKOBAUDAT</b>
001	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planum herstellen</li> </ul>
002	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planum herstellen</li> <li>• Stahlspundbohle einbringen/ziehen</li> <li>• Stahlspundbohle vorhalten</li> </ul>
005	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Öffnungen in Schalung herstellen</li> <li>• Flachdachausstieg</li> </ul>
007	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetationsmatte Moos-Sedum mit Fadengeflechteinlage</li> </ul>
009	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profildoppelzylinder</li> <li>• Einsteckschloss</li> </ul>
012	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untergrund reinigen/Betonreste entfernen</li> <li>• WDVS Kunststoffabschlussprofil</li> <li>• WDVS Anputzleiste</li> <li>• WDVS Gewebeeckwinkel</li> <li>• WDVS Diagonalbewehrung</li> </ul>
013	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drückergarnitur</li> <li>• Einsteckschloss</li> <li>• Trittschalldämmelement Treppenpodest zu Wand</li> </ul>
101	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drückergarnitur</li> <li>• Einsteckschloss</li> <li>• Untergrund reinigen/Betonreste entfernen</li> <li>• Überstand Randdämmstreifen abschneiden</li> </ul>
102	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drückergarnitur</li> <li>• Einsteckschloss</li> <li>• Untergrund reinigen/Betonreste entfernen</li> <li>• Überstand Randdämmstreifen abschneiden</li> <li>• Kunstharz-Dispersion</li> </ul>
103	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untergrund reinigen/Betonreste entfernen</li> </ul>

**Modellentwicklung**

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überstand Randdämmstreifen abschneiden</li> </ul>
005a	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flachdachausstieg</li> </ul>
009a	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profildoppelzylinder</li> <li>• Einsteckschloss</li> </ul>
010a	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brettschichtholzstütze abbinden und aufstellen</li> </ul>
012a	<ul style="list-style-type: none"> <li>• WDVS Kunststoffabschlussprofil</li> <li>• WDVS Anputzleiste</li> <li>• WDVS Gewebeeckwinkel</li> <li>• WDVS Diagonalbewehrung</li> </ul>
101a	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drückergarnitur</li> <li>• Einsteckschloss</li> <li>• Überstand Randdämmstreifen abschneiden</li> </ul>

**Tabelle 6 Übersicht Bauteile/-leistungen ohne Ökobilanzdaten in der ÖKOBAUDAT, eigene Darstellung**

Die Ökobilanzdaten der ÖKOBAUDAT beziehen sich in Abhängigkeit des betrachteten Bauteils bzw. Prozess auf eine bestimmte Einheit. Die Gesamtverbräuche von grauer Energie sowie die Gesamtmenge fossiler Treibhausgasemissionen berechnen sich aus der Summe der Bilanzwerte der einzelnen Lebenszyklusphasen multipliziert mit der ermittelten Menge eines Bauteils bzw. einer Bauleistung. Die Summe der Potenziale außerhalb der Systemgrenze des Bauwerks (Phase D) wird separat berechnet und in dem Moduldatenblatt erfasst. Dabei fließen auch die Potenziale, die bei einem Bauteilaustausch entstehen, mit in die Berechnung ein.

Die EPDs aus der ÖKOBAUDAT, die mit der EN 18504+A4 konform sind, geben Auskunft zu den Lebenszyklusphasen A1-A3 (Von der Wiege bis zum Werkstor/Herstellungsphase), C1-C4 (Entsorgungsphase) und D (End-of-Life-Potenzial). Wenn es sich nicht um generische Datensätze handelt, werden darüber hinaus auch Werte zu der Lebenszyklusphase A5 (Bau-/Einbauprozess) gegeben. Die Ökobilanzdaten bzw. EPDs gemäß EN 18504+A2 haben grundsätzlich eine Transportdistanz zur Verwertungsstelle/Deponie (Lebenszyklusphase C2) von 50 km angesetzt und keine Daten für den Transport zu dem Bauwerk (Lebenszyklusphase A4) angegeben. Damit das Modell bei allen Bauteilen und -leistungen auch die Lebenszyklusphase A4 mitberücksichtigt, werden vereinfacht für diese Phase dieselben Bilanzwerte wie bei der Lebenszyklusphase C2 angesetzt. Eine Ausnahme zu dieser Annahme besteht bei Bauleistungen, die im Zusammenhang mit Transportbeton stehen. Hier sind in der ÖKOBAUDAT auch Bilanzwerte für den Transport zum Bauwerk (Lebenszyklusphase A2) gegeben, die im Modell so Berücksichtigung finden.

#### **Modellentwicklung**

Für die Ersatzinstandsetzungen werden die Ökobilanzdaten der Phasen A1-A5 und C1-C4 summiert und als Wert für die Lebenszyklusphase B4 (Ersatz) angesetzt.

Das Modell betrachtet zusammengefasst alle Phasen der Herstellung A1-A3, bei der Bauphase die Phase A4 und teilweise Phase A5, bei der Nutzungsphase die Phase B4, alle Phasen der Entsorgung C1-C4 sowie das Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recycling-Potenzial der Phase D.

Weiter ist für das Verständnis der Moduldatenblätter zu nennen, dass aus Gründen der Übersichtlichkeit und schnelleren Nachvollziehbarkeit die Ökobilanzdaten zu allen Lebenszyklusphasen den Leistungen der Bauteilherstellung zugeordnet sind. Diese Bauteile bzw. -leistungen sind in den Moduldatenblättern ohne farbliche Hinterlegung (vergleiche Abbildung 3 sowie Anhang A).

#### **4.4.4. Bepreisung fossiler Treibhausgasemissionen**

Zur Ermittlung der Kosten in Folge einer fiktiven weltweiten CO<sub>2</sub>-Steuer auf fossile Treibhausgasemissionen werden drei unterschiedlich hohe CO<sub>2</sub>-Preise angesetzt. Als erster CO<sub>2</sub>-Preis wird der in Deutschland im Jahr 2021 gültige CO<sub>2</sub>-Preis auf fossile Endenergie angesetzt. Dieser beträgt 25 € pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq.. Weiter wird der CO<sub>2</sub>-Preis von 55 € berücksichtigt, welcher ab 01.01.2025 in Deutschland gültig sein wird. Als letzter und maximaler CO<sub>2</sub>-Preis werden 130 € zugrunde gelegt. Dieser Wert stammt aus einer Arbeit mit dem Titel *Optionen für eine CO<sub>2</sub>-Preisreform* von Edenhofer et al. (2019). Nach deren Meinung sollte dieser CO<sub>2</sub>-Preis spätestens ab 2030 auf fossile Endenergie gelten, sodass die Klimaschutzziele erreicht werden (Edenhofer et al., 2019, S. 8).

Auf Basis der ermittelten fossilen Treibhausgasemissionen in der Einheit Kilogramm-CO<sub>2</sub>-Äquivalente (kg CO<sub>2</sub>-eq.) auf Ebene der Bauteile bzw. -leistungen erfolgt die Berechnung der fiktiven CO<sub>2</sub>-Steuerbelastungen. So werden in drei separaten Berechnungen, die CO<sub>2</sub>-Steuern für die Preise 25 €, 55 € sowie 130 € pro Tonne fossile Treibhausgasemissionen berechnet.

## 5. Ergebnis

### 5.1. Modulstruktur Wohngebäude

In dem vorherigen Kapitel wurde ein Modell mit Standard- und Alternativmodulen entwickelt, welches die wesentliche Baukonstruktion von Wohngebäuden abbildet.

Insgesamt sind 23 Module entwickelt worden. Diese teilen sich auf in zwei Standardmodulvarianten der Baugrube, elf Standardmodule des Rohbaus, drei Standardmodule des nicht-technischen Ausbaus sowie sechs alternative Standardmodule des Rohbaus und einem alternativen Standardmodul des nicht-technischen Ausbaus. Eine Übersicht der Modulstruktur ist in Tabelle 7 gegeben. In dieser Tabelle ist zusätzlich eine Gegenüberstellung mit den enthaltenen Bauteilen und -leistungen gemäß den KG der DIN 276:2018-12 enthalten. Die in der Tabelle 7 aufgeführten Module können dem Anhang A entnommen werden.

	<b>Module des Modells</b>	<b>KG nach DIN 276</b>
Standardmodule Baugrube	001 - Baugrube mit Böschung 002 - Baugrube mit Spundwandverbau	311 Herstellung 396 Materialentsorgung
Standardmodule Rohbau und Ge- bäudehülle	003 - Bodenplatte aus WU-Beton	322 Flachgründungen und Bodenplatte 325 Abdichtungen und Bekleidungen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	004 – Geschossdecken	351 Deckenkonstruktion 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	005 - Dachgeschossdecke	361 Dachkonstruktionen 362 Dachöffnungen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	006 – Attika	332 Nichttragende Außenwände 335 Außenwandbekleidungen, außen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	007 - Dachbeläge	363 Dachbeläge 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	008 - Tragende Außenwände der unterirdischen Geschosse	331 Tragende Außenwände 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung

	009 - Tragende Außenwände der oberirdischen Geschosse	331 Tragende Außenwände 334 Außenwandöffnungen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	010 - Tragende Innenstützen in allen Geschossen	343 Innenstützen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	011 – Außenwandbekleidungen der unterirdischen Geschosse	335 Außenwandbekleidungen, außen 336 Außenwandbekleidungen, innen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	012 – Außenwandbekleidungen der oberirdischen Geschosse	335 Außenwandbekleidungen, außen 336 Außenwandbekleidungen, innen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	013 - Treppenhaus	341 Tragende Innenwände 344 Innenwandöffnungen 351 Deckenkonstruktionen 355 Elementierte Deckenkonstruktionen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
Standardmodule nicht-technischer Ausbau	101 – Ausbau der Aufenthalts- und Küchenräume 102 – Ausbau der Nassräume 103 – Ausbau der Wohnungseingangsbereich/Flure	342 Nichttragende Innenwände 344 Innenwandöffnungen 345 Innenwandbekleidungen 353 Deckenbeläge 354 Deckenbekleidungen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung 397 Zusätzliche Maßnahmen
Alternativmodule Rohbau und Gebäudehülle	004a – Alternative Geschossdecken	351 Deckenkonstruktionen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	005a – Alternative Dachgeschossdecke	361 Dachkonstruktionen 362 Dachöffnungen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	006a – Alternative Attika	332 Nichttragende Außenwände 335 Außenwandbekleidungen, außen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	009a – Alternative Tragende Außenwände der oberirdischen Geschosse	331 Tragende Außenwände 334 Außenwandöffnungen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	010a – Alternative Tragende Innenstützen in allen Geschossen	343 Innenstützen 345 Innenwandbekleidungen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
	012a – Alternative Außenwandbekleidungen der oberirdischen Geschosse	335 Außenwandbekleidungen, außen 336 Außenwandbekleidungen, innen

## Ergebnis

		394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung
Alternativmodule nicht-technischer Ausbau	101a – Alternativer Ausbau der Aufenthalts- und Küchenräume	342 Nichttragende Innenwände 344 Innenwandöffnungen 345 Innenwandbekleidungen 353 Deckenbeläge 354 Deckenbekleidungen 394 Abbruchmaßnahmen 396 Materialentsorgung 397 Zusätzliche Maßnahmen

**Tabelle 7 Übersicht der entwickelten Module mit Gegenüberstellung der enthaltenen KG nach DIN 276:2018-12, eigene Darstellung**

Jedes Modul verfügt über die Formeln zur Berechnung der jeweiligen Bauteilmengen, auf dessen Basis die weitere Ermittlung der angestrebten Ausgabewerte erfolgt. Die Sammlung der Formeln zur Bauteilmengenermittlung ist in Anhang C gegeben.

Jedes Bauteil ist mit einem Kennwert zur grauen Energie, zu fossilen Treibhausgasemissionen und Baukosten verknüpft worden. Weiter erfolgt auf Ebene der Bauteile bzw. -leistungen die Berechnung der fiktiven CO<sub>2</sub>-Steuern.

## 5.2. Anwendungsmethodik des Modells

Um Anwendenden das entwickelte Modell verfügbar zu machen, wurde die zuvor beschriebene Modulstruktur in ein elektronisches Datenverarbeitungssystem überführt. Hier wurde auf das Programm Excel von Microsoft © zurückgegriffen.

Die Anwendung des Modells von Seiten der Nutzenden erfolgt in drei Schritten. In der Abbildung 39 ist die grundlegende Anwendungsmethodik des Modells aufgezeigt. Als erster Schritt sind Anwendende aufgefordert, die nachfolgend aufgelisteten neun Eingabeparameter für das betrachtete Wohngebäude festzulegen und in die Eingabemaske, wie in Abbildung 40 dargestellt, einzutragen. Die weiteren Parameter ergeben sich aus den eingegebenen Parametern.

In den Klammern hinter den Eingabeparameterbezeichnungen sind die Abkürzungen der Variablen, wie Sie in der Formelsammlung in Anhang C berücksichtigt werden, benannt:

- Gebäudebreite (GB)
- Gebäudelänge (GL)

### Ergebnis

- Anzahl der unterirdischen Geschosse (AUG)
- Anzahl der oberirdischen Geschosse (AOG)
- Lichte Raumhöhe (LR)
- Anzahl der Wohneinheiten je Geschoss (WEE)
- Anzahl der Aufenthaltsräume je Wohneinheit (AWE)
- Geplante Nutzungsdauer (ND)
- Auswahl Ausführungsvariante der Baugrube zwischen Böschung und Spundwandverbau (B-G/B-S)

Bei der Anwendung des Modells ist zu beachten, dass jedes Geschoss wie ein Regelgeschoss betrachtet wird. Deshalb sind für jedes Geschoss dieselben Annahmen festzulegen. Wird bei einer realen Gebäudeplanung kein regelmäßiger Geschossaufbau verfolgt, so sind bei der Anwendung des Modells vereinfachend die Durchschnittswerte der erforderlichen Eingabeparameter festzulegen.

Auf Basis der Eingabeparameter werden innerhalb der Moduldatenblätter die Verbräuche von grauer Energie, die fossilen Treibhausgasemissionen, die Lebenszykluskosten sowie die fiktiven CO<sub>2</sub>-Steuern berechnet. Die jeweiligen Werte auf Modulebene werden anschließend getrennt nach der Standard- und Alternativbauweise kumuliert und in Form von Säulen-Diagrammen ausgegeben. Folglich erhalten Anwendende vier Ausgabediagramme zu grauer Energie, fossilen Treibhausgasemission, Lebenszykluskosten und Lebenszykluskosten inkl. der fiktiven CO<sub>2</sub>-Steuern. Dabei werden die beiden Bauweisen (Standard/Alternative) gegenübergestellt abgebildet, sodass ein direkter Vergleich der Bauweisen ermöglicht wird.



Abbildung 39 Anwendungsmethodik des Modells, eigene Darstellung

Eingabemaske - Angaben zum Wohngebäude	
Gebäudebreite [m]	GB
Gebäuelänge [m]	GL
Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	GF
Anzahl Untergeschosse [-]	AUG
Anzahl oberirdische Geschosse EG u. OG [-]	AOG
Anzahl Geschosse gesamt [-]	AG
Summe Fenster gesamtes Gebäude [-]	SF
Summe Innenstützen je Geschoss [-]	SIS
Lichte Raumhöhe [m]	LR
Geschosshöhe [m]	GH
Gebäudehöhe über Geländeoberkante [m]	GHO
Gebäudehöhe gesamt ohne Bodenplatte [m]	GHG
Geschosshöhe der Alternativmodule [m]	GHa
Gebäudehöhe der Alternativmodule über Geländeoberkante [m]	GHOa
Gebäudehöhe der Alternativmodule gesamt ohne Bodenplatte [m]	GHGa
Anzahl Wohnungen je Etage [-]	WEE
Anzahl Aufenthaltsräume je Wohnung [-]	AWE
Fläche Aufenthaltsraum [m <sup>2</sup> ]	FAR
Nutzungsdauer = Bilanzierungszeitraum [a]	ND
Option Baugrube gebösch/Baugrube mit Spundwandverbau	B-G/B-S

Abbildung 40 Eingabemaske des Modells, eigene Darstellung

Ergebnis



### 5.3. Anwendung des Modells

Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Anwendungsmethodik wird nachfolgend das Modell mit einem Realbeispiel angewendet.

Bei dem Realbeispiel handelt es sich um ein Wohngebäude, das ab 2015 geplant und zwischen 2017 und 2018 in München realisiert wurde. Die Planungsunterlagen des nachfolgend beschriebenen Anwendungsbeispiels liegen dem Autor vor. Aus Gründen des Urheberrechts können keine Abbildungen zu Grundrissen oder Ansichten in dieser Arbeit gegeben werden.

Das Anwendungsbeispiel besteht aus zwei Gebäuden mit unterschiedlichen Grundflächen, aber mit denselben Qualitäten. Zur weiteren Unterscheidung wird das eine Gebäude mit Gebäude 1 und das andere Gebäude mit Gebäude 2 bezeichnet. Aufgrund der zwei Gebäude ist das Modell zwei Mal anzuwenden respektive müssen für die beiden Gebäude die Eingabeparameter separat festgelegt werden.

Beide Gebäude haben die gleiche Breite von 13,5 m. Die Länge des Gebäude 1 beträgt 15 m und des zweiten Gebäudes 27 m. Darüber hinaus haben beide Gebäude sechs oberirdische Geschosse (Erdgeschoss, Obergeschosse und Dachgeschoss) und ein Untergeschoss sowie eine Tiefgarage. Für die Tiefgarage besteht in dem Modell kein Modul, weshalb auch keine weitere Berücksichtigung bei der Anwendung des Modells erfolgt. Die nicht eingehende Berücksichtigung sollte bei der späteren Auswertung der Diagramme beachtet werden.

In der Tabelle 8 sind die entstandenen Wohneinheiten je Geschoss aufgelistet. Bezogen auf das Gebäude 1 sind durchschnittlich zwei Wohneinheiten je Geschoss und bei dem Gebäude 2 sind durchschnittlich vier Wohneinheiten je Geschoss entstanden. Diese beiden Durchschnittswerte der Wohneinheiten je Geschoss werden für die Anwendung festgelegt.

<b>Geschoss</b>	<b>Gebäude 1</b>	<b>Gebäude 2</b>
Erdgeschoss:	1 Wohneinheit	4 Wohneinheiten
1. Obergeschoss:	2 Wohneinheiten	4 Wohneinheiten
2. Obergeschoss:	2 Wohneinheiten	4 Wohneinheiten
3. Obergeschoss:	2 Wohneinheiten	4 Wohneinheiten
4. Obergeschoss:	2 Wohneinheiten	4 Wohneinheiten
Dachgeschoss:	1 Wohneinheit	2 Wohneinheiten
<b>Summe:</b>	<b>10 Wohneinheiten</b>	<b>22 Wohneinheiten</b>

Tabelle 8 Übersicht der Wohneinheiten des Anwendungsbeispiels, eigene Darstellung

Als weiterer Parameter bedarf es die durchschnittliche Anzahl der Aufenthaltsräume je Wohneinheit. Hier sind in dem Anwendungsbeispiel in Gebäude 1 überwiegend Wohnungen mit drei Aufenthaltsräumen und in Gebäude 2 hauptsächlich Wohnungen mit zwei Aufenthaltsräumen umgesetzt worden.

<b>Wohnungsgröße</b>	<b>Gebäude 1</b>	<b>Gebäude 2</b>
1 Zimmer:	-	1
2 Zimmer:	4	19
3 Zimmer:	6	2
<b>Summe:</b>	<b>10</b>	<b>22</b>

Tabelle 9 Übersicht der Wohnungsgröße der Wohneinheiten des Anwendungsbeispiels, eigene Darstellung

Die durchschnittliche lichte Höhe beider Gebäude liegt bei 2,5 m. Als Standardeinstellung wird in dem Modell eine Nutzungsdauer des Wohngebäudes von 50 Jahren angesetzt. Als letzten Parameter wird die Variante der Baugrubenausführung benötigt. In dem Anwendungsbeispiel wurde eine kombinierte Baugrube aus Böschung und Spundwände ausgeführt. Der überwiegende und somit für die Modellanwendung maßgebliche Anteil der Baugrube wurde mittels einer Böschung hergestellt.

## 5.4. Berechnungsergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse, die sich bei der Anwendung des zuvor beschriebenen Wohngebäudebeispiels ergeben, dargestellt.

Es werden zu den Berechnungen der grauen Energie, der fossilen Treibhausgasemissionen und der CO<sub>2</sub>-Steuer je zwei Ausgabediagramme von dem Modell ausgegeben. Bei der Auswertung der Lebenszykluskosten sind es in Summe drei Diagramme. Bei allen Ausgabediagrammen handelt es sich um Säulendiagramme, die entweder einen Vergleich aller Module oder den Vergleich der Standard- mit der Alternativbauweise ermöglichen.

Das Modell geht bei der Anwendung standardmäßig von einem zu berechnenden Objekt aus. Das hier gewählte Anwendungsbeispiel stellt einen Spezialfall, aufgrund der zwei getrennten Gebäude, dar, was eine doppelte Anwendung des Modells erforderlich macht.

Die nachfolgenden Ergebnisse des Anwendungsbeispiels sind für die Gebäude 1 und 2 zusammengefasst, also wie ein Gebäude, dargestellt.

### 5.4.1. Berechnung der grauen Energie

Das Säulendiagramm in Abbildung 41 zeigt die Ausgabewerte zur grauen Energie untergliedert in alle im Modell enthaltenen Modulen. Nicht bei allen Alternativen zeigt sich, dass der Verbrauch von grauer Energie in den Lebenszyklusphasen A-C, also innerhalb der Systemgrenzen, niedriger als bei den äquivalenten Standardmodulen ist. Die Module 010a und 101a verbrauchen mehr graue Energie als die äquivalenten Standardmodule. Das Modul 010a weist einen 136,6 % und das Modul 101a einen 9,0 % höheren Verbrauch von grauer Energie auf als die Module 010 bzw. 101. Bei den End-of-Life-Potenzialen sind die Verhältnisse anders. Lediglich das Modul 012a besitzt ein niedrigeres Potenzial von 71 % gegenüber dem Standardäquivalent.

Das größte Einsparpotenzial in den Phasen A-C hat das Alternativmodul 009a im Vergleich zum Standardmodul 009. Hier ist eine absolute Einsparung von 891 Tausend-MJ bzw. eine prozentuale Einsparung von 33,6 % möglich. Auf das Gesamtgebäude in Standardbauweise, wie in Abbildung 42 zu sehen, macht das 6,0 % des gesamten Verbrauchs von grauer Energie aus.

**Ergebnis**

Das größte End-of-Life-Potenzial weisen die Alternativmodule 004a und 005a auf. Die Ausführung der Decken in Holzbauweise führt zu einem Potenzial von insgesamt 3.398 Tausend-MJ.

Das zweite Diagramm zur Auswertung der grauen Energie in Abbildung 42 ist ebenfalls ein Säulendiagramm, welches die Summe der grauen Energie aufgeschlüsselt nach Bauweise und Lebenszyklusphasen aufzeigt.

Bei dem Anwendungsbeispiel zeigt sich, dass die Standardbauweise innerhalb der Systemgrenzen (Lebenszyklusphasen A-C) insgesamt 14.975 Tausend-MJ verbraucht. Gegenüber der Standardbauweise verbraucht die Alternativbauweise 6,1 % weniger graue Energie, was einem absoluten Verbrauch von 14.064 Tausend-MJ entspricht. Der geringe Unterschied des Verbrauchs von grauer Energie beider Bauweisen kann darauf zurückgeführt werden, dass in den ÖKOBAUDAT-Datensätzen der Holzbauteile für die Trocknung des Holzes hohe fossile Energieverbräuche berücksichtigt sind (König, 2022).

Wird das End-of-Life-Potenzial, also die Phase D, der beiden Bauweisen verglichen, so weist die Standardbauweise ein Potenzial von -815 Tausend-MJ und die Alternativbauweise ein Potenzial von -6.595 MJ auf. Das Potenzial der Alternativbauweise außerhalb der eigenen Systemgrenzen graue Energie zu substituieren bzw. zu vermeiden ist um 706,0 % höher als bei der Standardbauweise.

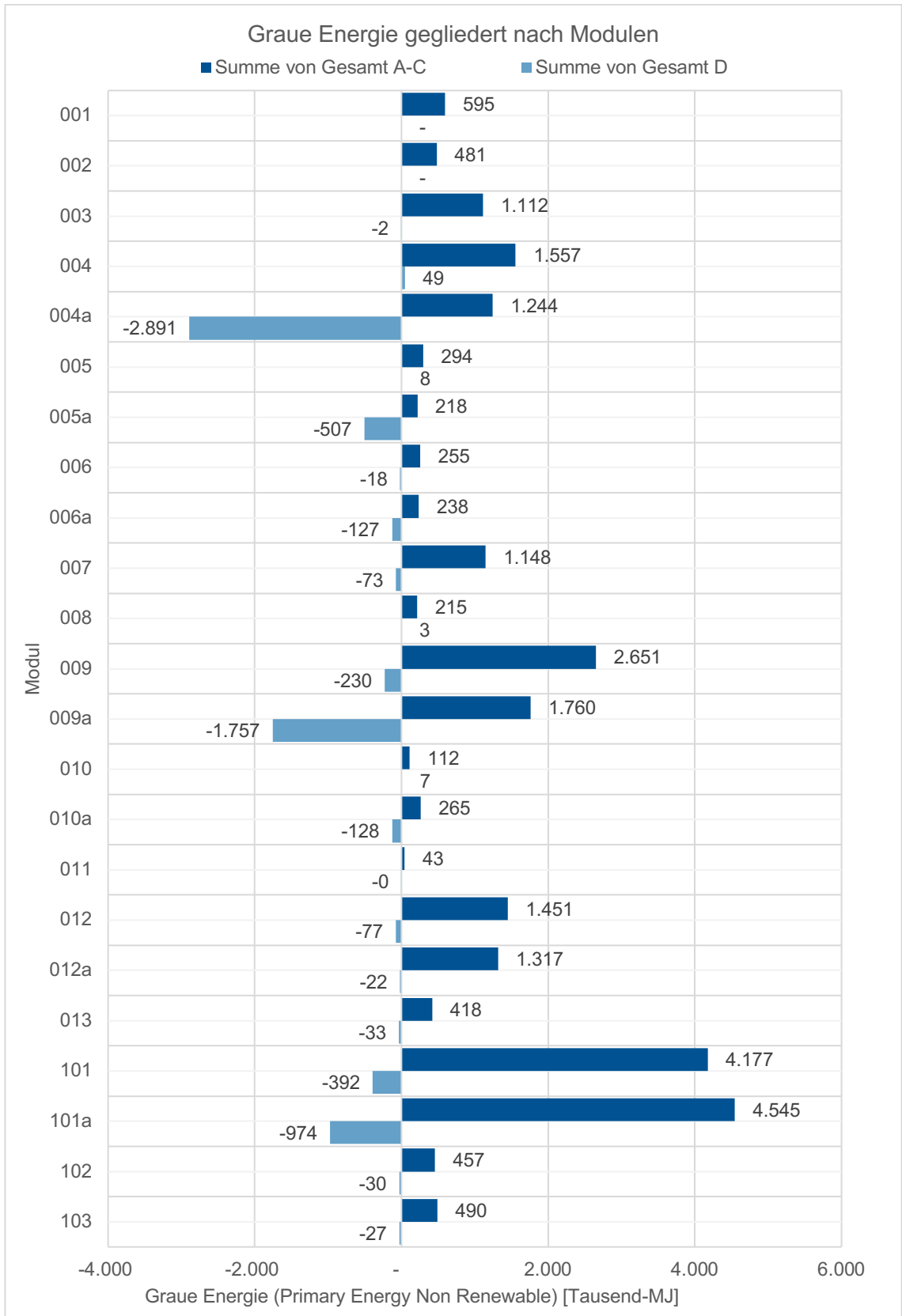


Abbildung 41 Graue Energie gegliedert nach Modulen, eigene Darstellung

**Ergebnis**

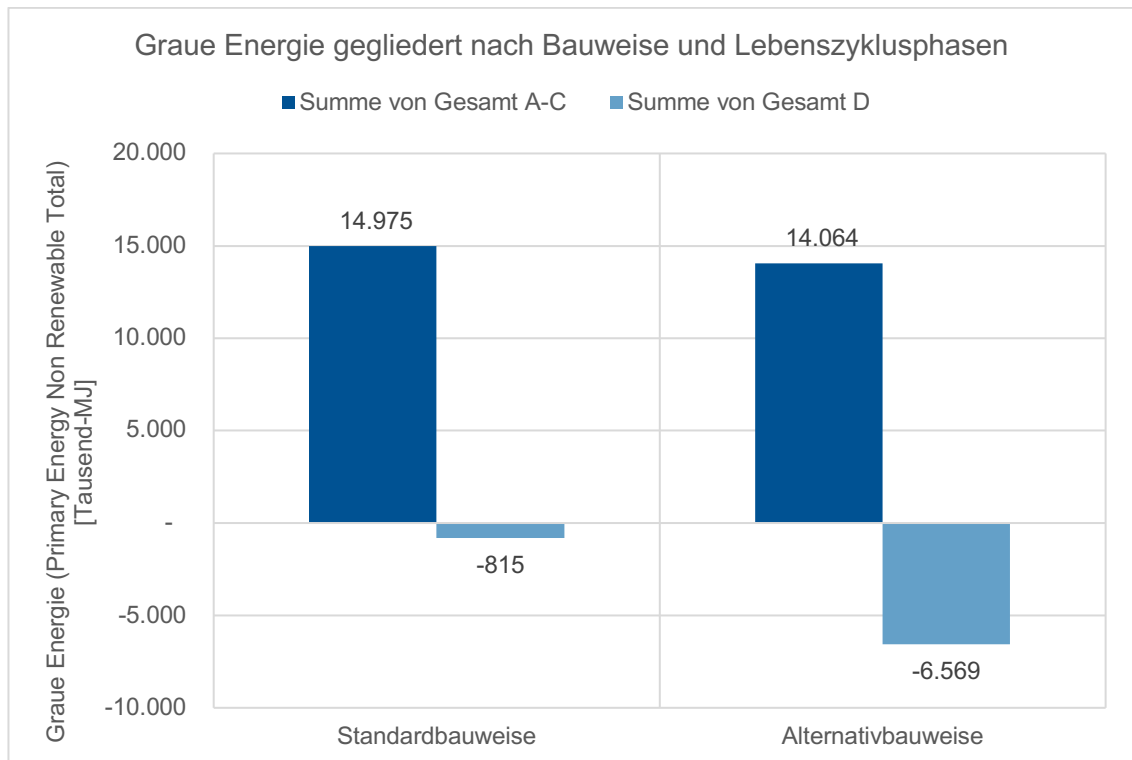


Abbildung 42 Graue Energie gegliedert nach Bauweise und Lebenszyklusphasen, eigene Darstellung

#### 5.4.2. Berechnung der fossilen Treibhausgasemissionen

In der Abbildung 43 sind die Ergebnisse der fossilen Treibhausgasemissionen gegliedert nach den Modulen aufgezeigt. Bei einem Vergleich der Module zeigt sich, dass innerhalb Phasen A-C nur das Alternativmodul 010a einen höheren Wert als das Standardmodul 010 aufweist. Hier erzeugt die Alternative um 71 % mehr fossile Treibhausgase über den gesamten Lebenszyklus als der Standard. Das größte Einsparpotenzial hinsichtlich fossiler Treibhausgasemissionen entsteht durch die Substitution der Module 004 und 005 mit den Modulen 004a und 005a. Dadurch ist eine absolute Einsparung von 260 Tonnen-CO<sub>2</sub>-Äquivalente möglich. Auf das Gesamtgebäude gesehen entspricht das einer Einsparung von über 15,2 % der gesamten Treibhausgase gegenüber der Standardbauweise.

Bei der Betrachtung der End-of-Life-Potenziale der Phase D dokumentiert die Abbildung 43, dass alle Alternativmodule, außer das Alternativmodul 012a, ein höheres Potenzial besitzen fossile Treibhausgase außerhalb der Systemgrenze zu vermeiden. Das Alternativmodul 012a enthält 75 % weniger Potenziale als das äquivalente Standardmodul 012. Die höchsten Potenziale, sowohl in absoluter Betrachtung als auch im prozentualen Vergleich zu den äquivalenten Standardmodulen, zeigen sich auch hier bei den Alternativmodulen 004a (Geschossdecken) und 005a (Dachgeschossdecke).

**Ergebnis**

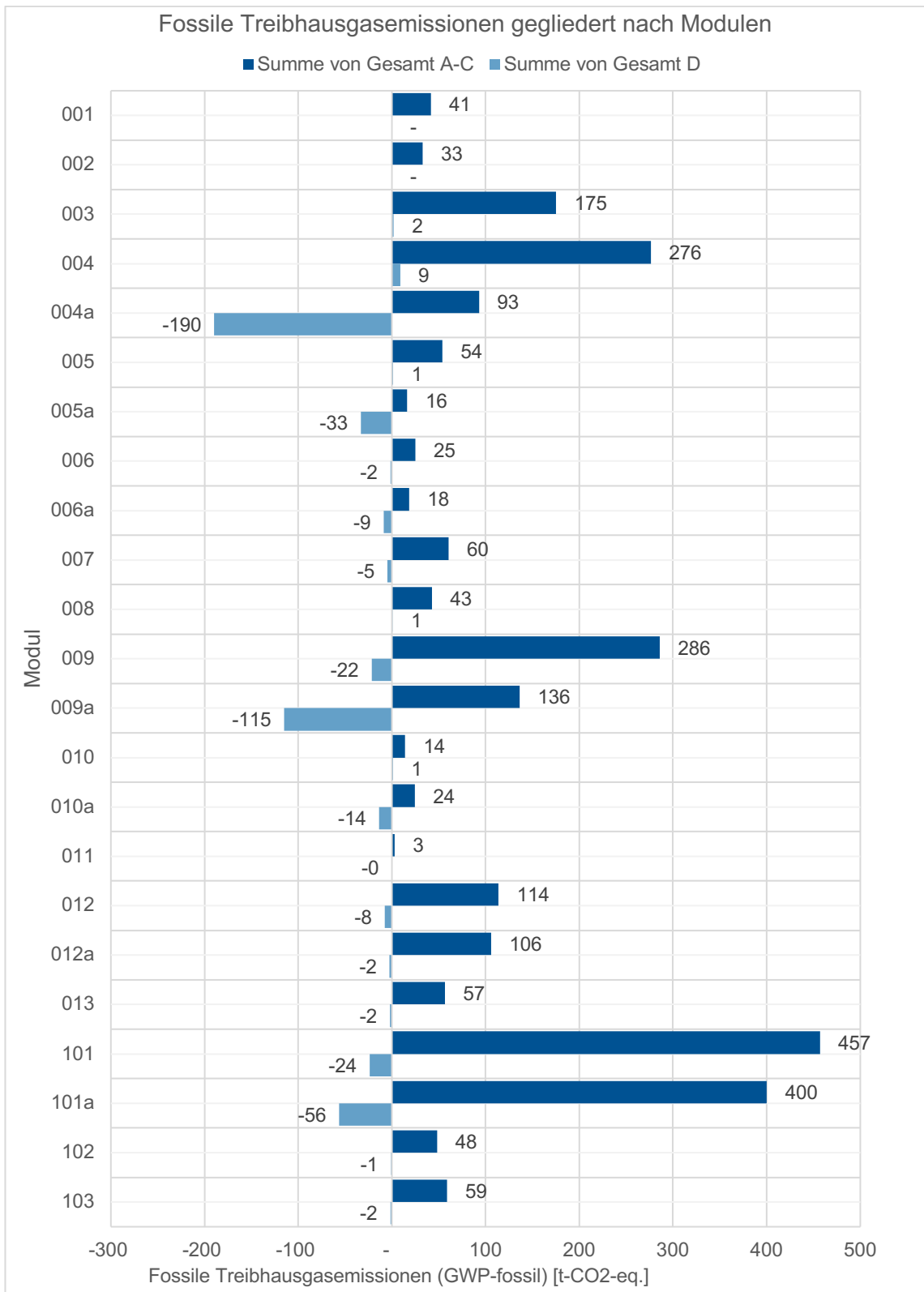


Abbildung 43 Fossile Treibhausgasemissionen gegliedert nach Modulen, eigene Darstellung

Die Abbildung 44 zeigt, wie bei der Auswertung der grauen Energieverbräuche, die Berechnungsergebnisse der fossilen Treibhausgasemissionen bezogen auf das Ergebnis

Gesamtgebäude. Die Ergebnisse sind gegliedert nach den beiden Bauweisen und den zusammengefassten Lebenszyklusphasen A-C sowie D.

Die Standardbauweise kommt insgesamt auf 1.712 Tonnen-CO<sub>2</sub>-Äquivalente wohingegen die Alternativbauweise, bei maximal möglichem Austausch der Standardmodule mit den Alternativmodulen, auf 1.280 Tonnen-CO<sub>2</sub>-Äquivalente kommt. Prozentual unterscheidet sich die Alternativbauweise um -25,2 % gegenüber der Standardbauweise.

Darüber hinaus stellt die Abbildung 44 die jeweiligen End-of-Life-Potenziale der Bauweisen dar. Die Standardbauweise besitzt ein Potenzial von -50 Tonnen-CO<sub>2</sub>-Äquivalente und die Alternativbauweise von -426 Tonnen-CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Die Alternative hat folglich ein um 752,0 % höheres Potenzial außerhalb der Systemgrenze fossile Treibhausgasemissionen einzusparen bzw. zu substituieren.

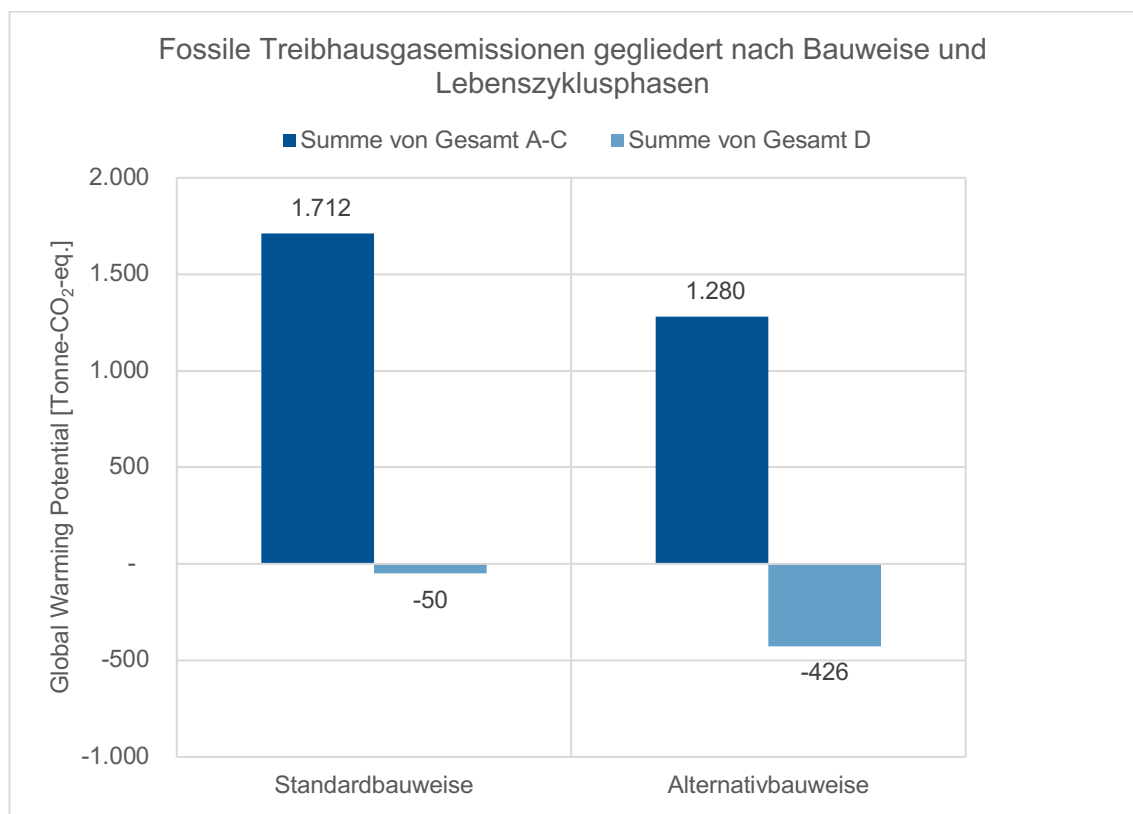


Abbildung 44 Fossile Treibhausgasemissionen gegliedert nach Bauweise und Lebenszyklusphasen, eigene Darstellung

### 5.4.3. Berechnung der Lebenszykluskosten

Das Säulendiagramm der Abbildung 45 zeigt die Kosten gegliedert nach den Lebenszyklusphasen und Modulen.

**Ergebnis**



Bei der Betrachtung der Herstellungskosten verursachen fünf von den insgesamt sieben Alternativmodulen mehr Kosten als die jeweiligen äquivalenten Standardmodule. Die Module 006a und 010a sind in der Herstellung günstiger als die Standardbauweise. Größtes Kosteneinsparpotenzial besitzt ersteres Alternativmodul, welches 22,2 % weniger Kosten mit sich bringt als das Standardmodul 006. Im Vergleich zur Standardbauweise sind die Alternativmodule 004a und 005a um 64,8 % bzw. 63,0 % jene Module, die am deutlichsten teurer sind. Bei den Herstellungskosten der Alternativbauweise ist zu betonen, dass insbesondere die Baupreise im Zusammenhang mit Holz im Jahr 2021 eine überdurchschnittliche Inflation erfahren haben (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021).

Hinsichtlich der Instandsetzungen erzeugen alle Alternativmodule außer das Alternativmodul 006a höhere oder gleichhohe Kosten als die Standardbauweise. Der höchste Kostenunterschied zeigt sich beim Alternativmodul 006a. Hier sind die Instandsetzungskosten um 31,7 % höher als beim Standardmodul 006. Bei den sonstigen Modulen sind die Kostenunterschiede vernachlässigbar gering.

In Bezug auf die Kosten für Abbruch und Verwertung sind sechs von sieben Alternativmodulen mit geringeren Kosten als die Standardmodule behaftet. Einzig das Standardmodul 012 ist marginal mit 1,2 % günstiger als das Alternativmodul 012a. Das größte prozentuale Einsparpotenzial in der Entsorgungsphase weist das Alternativmodul 006a mit -35,7 % unterschied zum Standardmodul 006 auf. Die größte absolute Kosteneinsparung erreichen die Alternativmodule 004a und 009a mit jeweils 39.000 €.

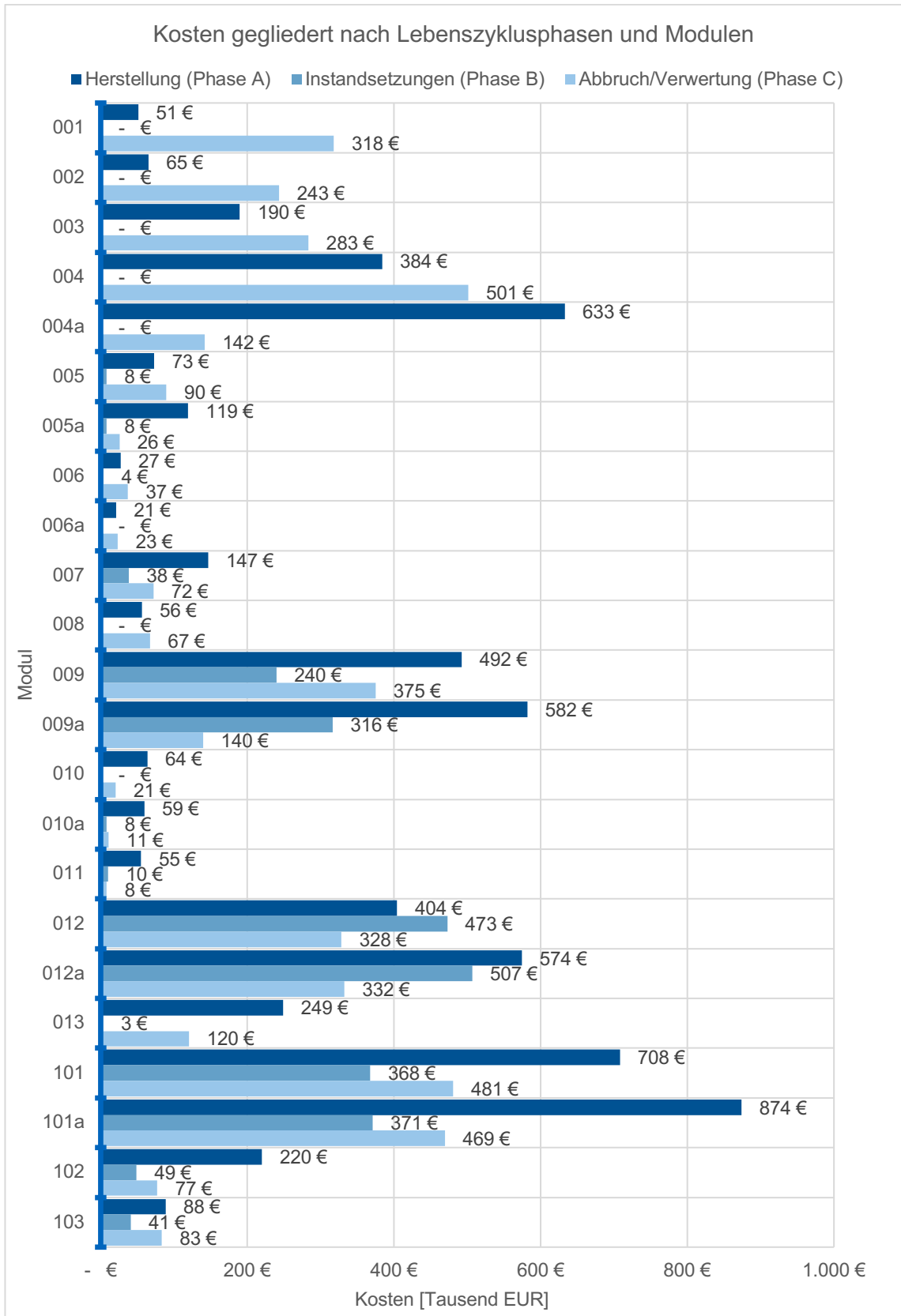
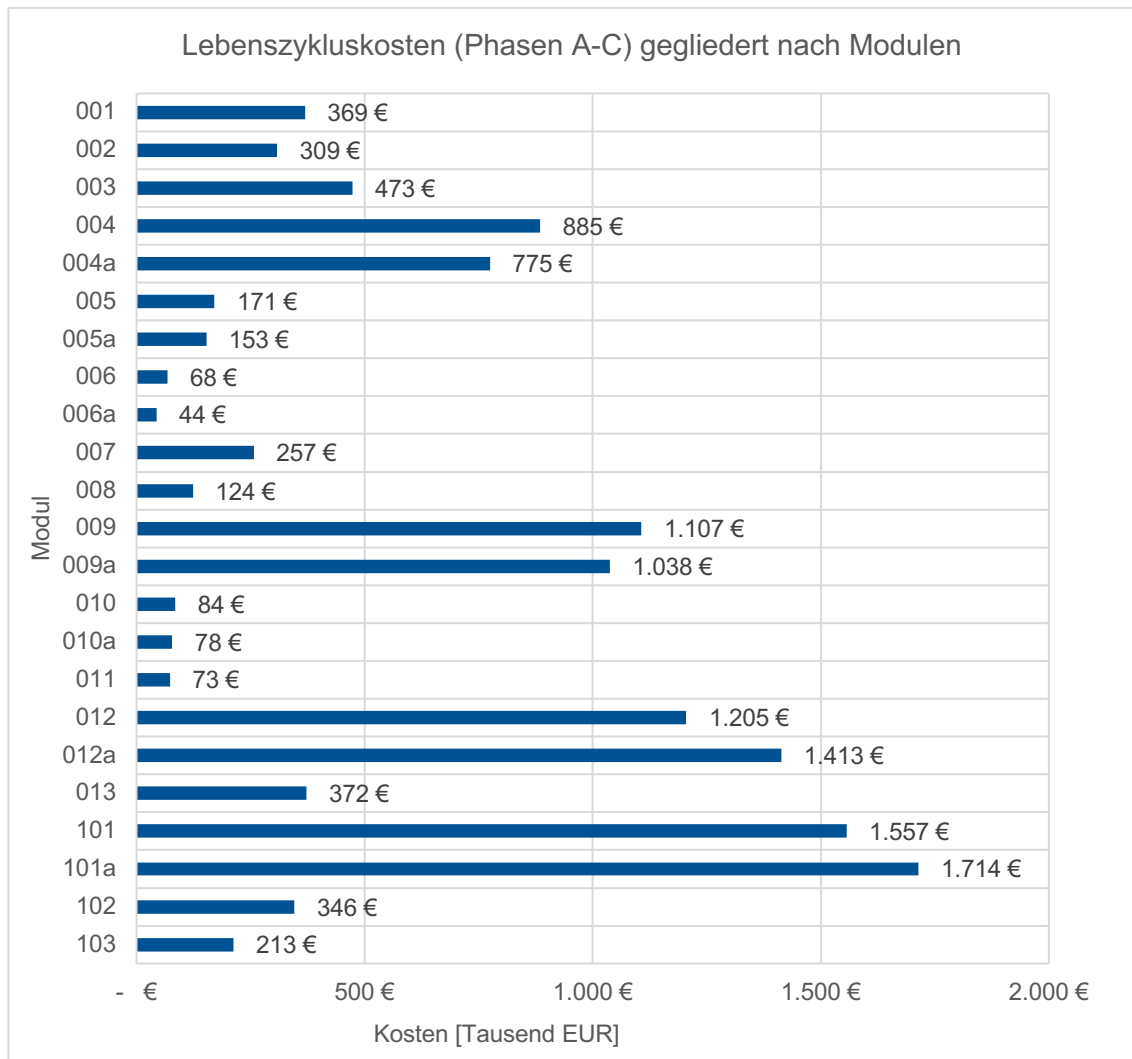


Abbildung 45 Kosten gegliedert nach Lebenszyklusphasen und Modulen, eigene Darstellung

**Ergebnis**

Die Abbildung 46 stellt die Lebenszykluskosten, also die Summe aus Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie die Kosten für Abbruch und Verwertung, gegliedert nach den Modulen dar. Das Säulendiagramm dokumentiert, dass mit den Alternativmodulen 004a, 005a, 006a, 009a sowie 010a über den gesamten Lebenszyklus weniger Kosten verbunden sind als mit den jeweiligen Äquivalenten in Standardbauweise. Wiederum sind die Lebenszykluskosten bei den Standardmodulen 012 und 101 geringer als bei den Alternativmodulen 012a und 101a. Die Substitution des Standardmoduls 004 durch das Alternativmodul 004a ist aus technisch-funktionaler Sicht nur in Kombination mit der Substitution des Standardmoduls 012 durch die Alternative 012a möglich. Das Alternativmodul 012a berücksichtigt die Zusatzmaßnahmen, die bei einer Holzbauweise insbesondere aufgrund des Brand- und Schallschutzes umzusetzen. So wird der Kostenvorteil des einen Moduls durch den Kostennachteil des anderen Moduls ausgeglichen.



**Abbildung 46 Lebenszykluskosten (Phasen A-C) gegliedert nach Modulen, eigene Darstellung**

Die Abbildung 47 zeigt die Kosten gegliedert nach Lebenszyklusphasen und Bauweisen. Insgesamt betrachtet ist die Ausführung des Wohngebäudes in Holzbauweise mit 7.442 Tausend-€ um 138 Tausend-€ teurer als die Lebenszykluskosten, die sich bei der Standardbauweise ergeben. Im Vergleich der Alternativbauweise zur Standardbauweise entspricht das einem prozentualen Unterschied von 1,9 %. Hinsichtlich der einzelnen Lebenszyklusphasen zeigen die Bauweisen größere Unterschiede auf. In der Herstellungsphase sind mit der Alternativbauweise 3.918 Tausend-€ und mit der Standardbauweise 3.208 Tausend-€ verbunden. In Prozent ausgedrückt entspricht das einem Unterschied von 22,1 %. Bei den Instandsetzungen sind die Kosten bei der Standardbauweise bei 1.234 Tausend-€ und bei der Alternativbauweise bei 1.352 Tausend-€. Das bedeutet ein prozentualer Unterschied von 9,6 %. In Bezug auf die Phase des Abbruchs und der Verwertung sind die Kosten, die mit der Standardbauweise

**Ergebnis**

verbunden sind, bei 2.863 Tausend-€. Daneben sind die Abbruch- und Verwertungskosten bei der Alternativbauweise bei 2.173 Tausend-€. Folglich verursacht die Alternativbauweise in dieser Phase 24,1 % weniger Kosten als die Standardbauweise.

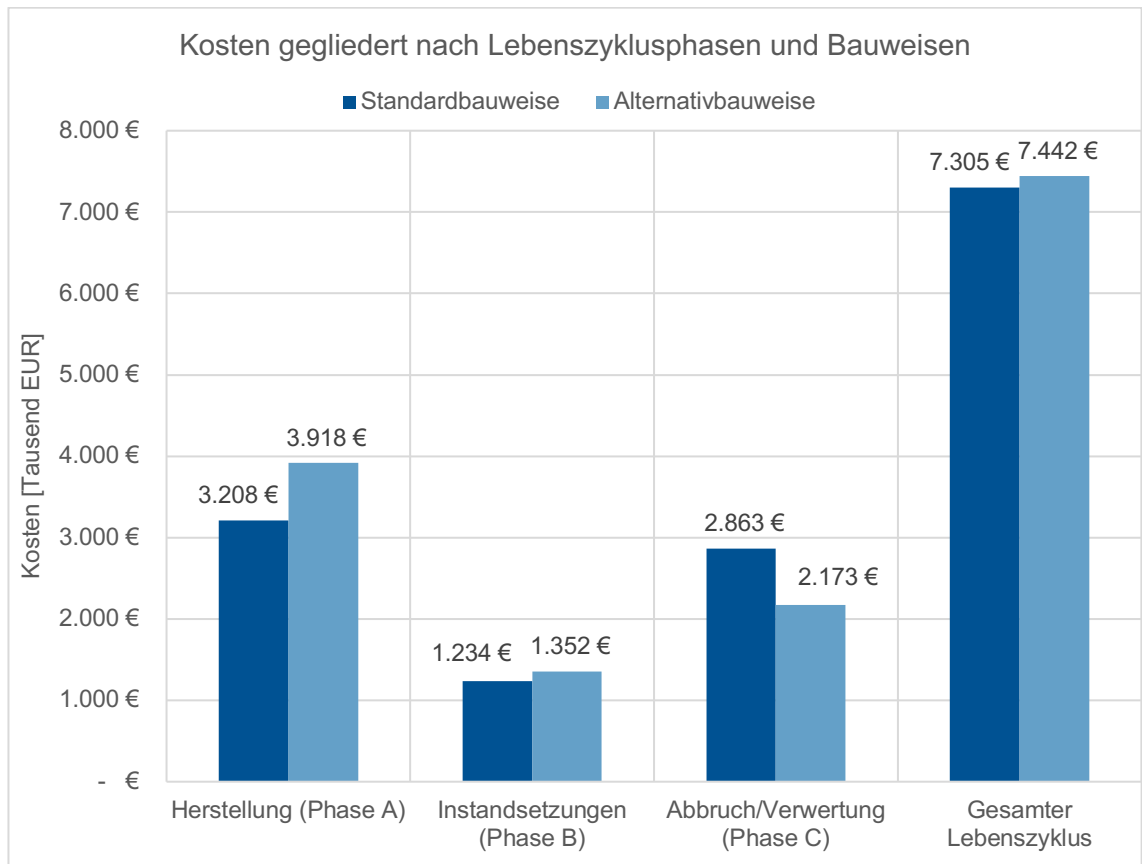


Abbildung 47 Kosten gegliedert nach Lebenszyklusphasen und Bauweisen, eigene Darstellung

#### **5.4.4. Berechnung der CO<sub>2</sub>-Steuern**

In der Abbildung 48 sind die Kosten, die durch eine fiktive weltweite CO<sub>2</sub>-Bepreisung auf die fossilen Treibhausgasemissionen entstehen würden. Das Säulendiagramm ist nach den unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Preisansätzen und Modulen untergliedert. Bei allen Standardmodulen außer bei dem Standardmodul 010 sind die CO<sub>2</sub>-Steuern höher als bei den äquivalenten Alternativmodulen. Hierbei ist das Alternativmodul mit 75 % höheren Steuern belegt als das Standardmodul. Den größten prozentualen Steuerkostenvorteil gegenüber der Standardbauweise hätte mit -70 % das Alternativmodul 005a. In absoluten Zahlen hätte das Alternativmodul 004a den größten Kostenvorteil im Vergleich zur Standardbauweise.

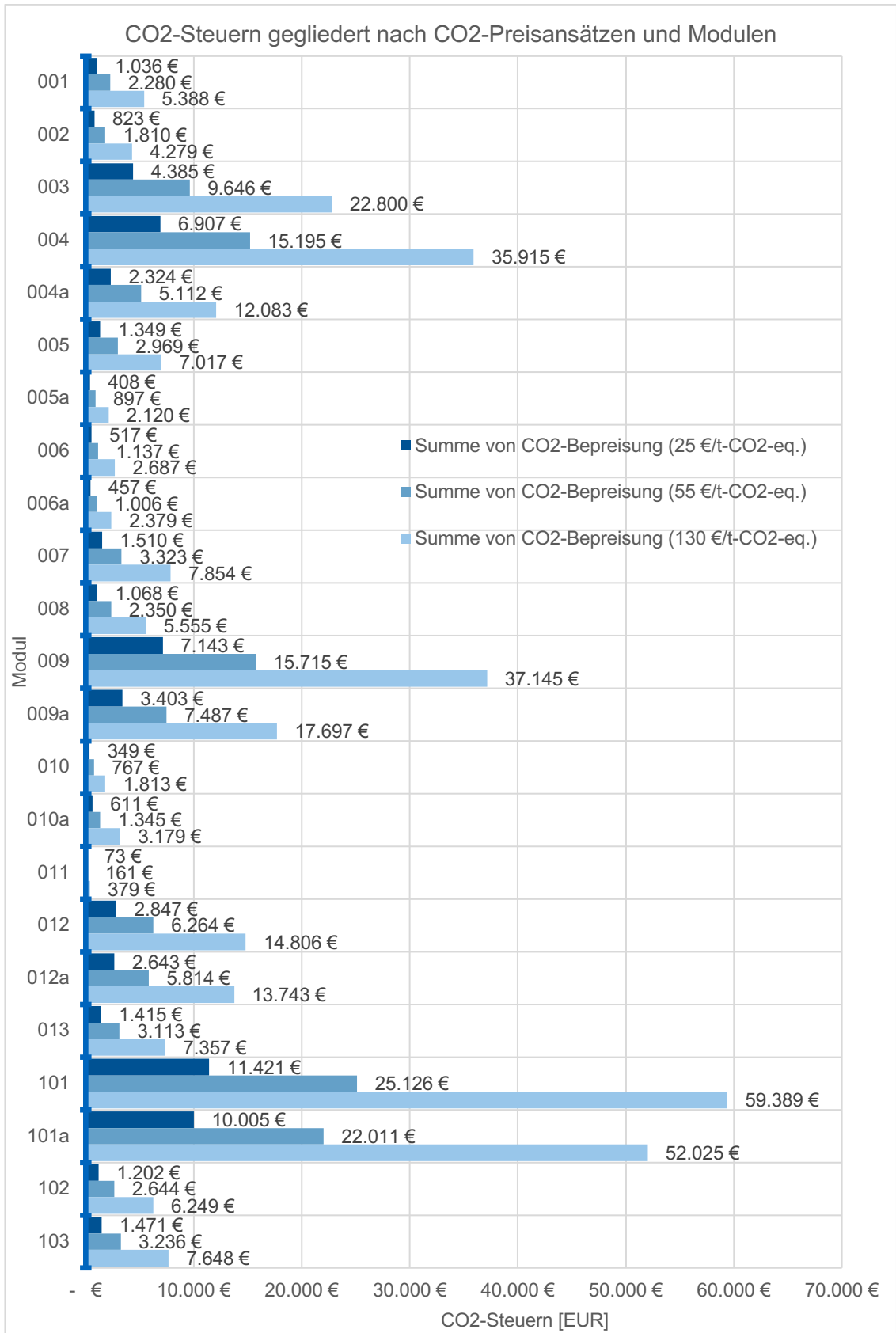


Abbildung 48 CO<sub>2</sub>-Steuer gegliedert nach CO<sub>2</sub>-Preisansätzen und Modulen, eigene Darstellung

**Ergebnis**

In Abbildung 49 sind die Lebenszykluskosten zum einen nach Bauweisen und zum anderen nach den enthaltenen fiktiven CO<sub>2</sub>-Steuern gegliedert. Auf der linken Seite sind die Lebenszykluskosten ohne fiktive CO<sub>2</sub>-Steuern aufgezeigt. Mittig zu sehen sind die Lebenszykluskosten inkl. CO<sub>2</sub>-Steuern mit einem CO<sub>2</sub>-Preis von 130 € auf die Lebenszyklusphasen A-C. Zur rechten Seite sind die Lebenszykluskosten wie mittig mit zusätzlicher Berücksichtigung der End-of-Life-Potenziale der Phase D dargestellt.

Würde eine fiktive weltweite CO<sub>2</sub>-Steuer auf fossile Treibhausgasemissionen erlassen werden, dann hätte das grundsätzlich eine Preissteigerung bei beiden Bauweisen zur Folge. Die Lebenszykluskosten der Alternativbauweise steigen aufgrund der geringeren fossilen Treibhausgasemissionen, die mit dieser Bauweise verbunden sind, weniger stark an. Das führt dazu, dass der prozentuale Unterschied der Lebenszykluskosten beider Bauweisen von 1,9 % um 0,8 %-Punkte auf 1,1 % abnimmt. Absolut betrachtet besteht dann ein monetärer Unterschied von 82 Tausend-€ statt 138 Tausend-€ ohne Besteuerung.

Würde darüber hinaus auch das End-of-Life-Potenzial bei so einer Besteuerung mit einfließen, dann liegt der Unterschied beider Bauweisen bei 0,4 % bzw. 33 Tausend-€.

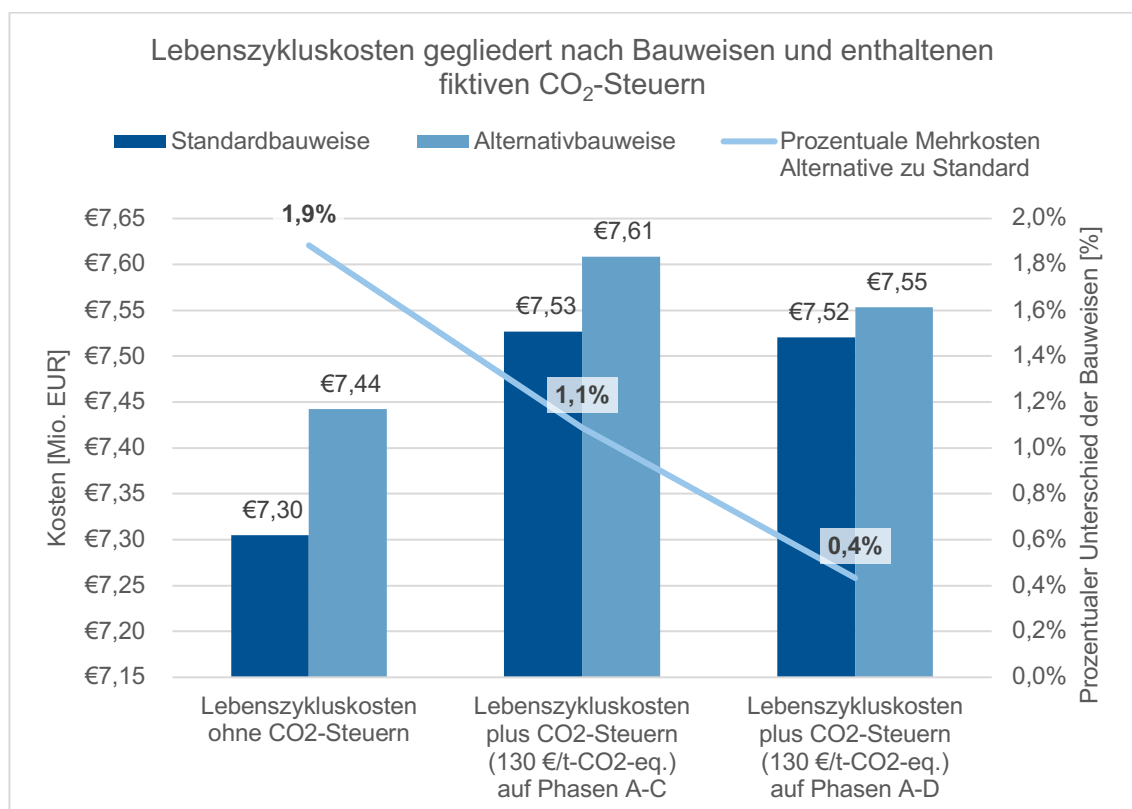


Abbildung 49 Lebenszykluskosten gegliedert nach enthaltenen CO<sub>2</sub>-Steuern, eigene Darstellung Ergebnis



#### 5.4.5. Berechnung eines alternativen CO<sub>2</sub>-Preises

Nachfolgend wird der CO<sub>2</sub>-Preis ermittelt, ab dem die Lebenszykluskosten inkl. CO<sub>2</sub>-Steuer auf die fossilen Treibhausgasemissionen innerhalb der Systemgrenze (Lebenszyklusphasen A-C) für beide Bauweisen gleich sind. Dazu müssen zunächst zwei Gleichungen aufgestellt werden, die dann gleichzusetzen sind. Beide Gleichungen haben den gleichen Aufbau. Es werden die Lebenszykluskosten mit dem Produkt aus fossilen Treibhausgasemissionen der Phasen A-C und dem fiktiven CO<sub>2</sub>-Preis als gesuchte Variable x summiert:

$$(1) 7.304.719 \text{ €} + 2.150 \text{ t-CO}_2\text{-eq.} \cdot x = 0$$

$$(2) 7.442.264 \text{ €} + 1.610 \text{ t-CO}_2\text{-eq.} \cdot x = 0$$

Nach Gleichsetzung der Gleichungen (1) und (2) und Auflösung nach der Variable x ergibt das den fiktiven CO<sub>2</sub>-Preis von rund 255 €. Folglich würde ein höherer CO<sub>2</sub>-Preis als 255 € bei einer fiktiven weltweiten CO<sub>2</sub>-Besteuerung auf fossile Treibhausgasemissionen dazu führen, dass die Alternativbauweise geringere Gesamtkosten als die Standardbauweise aufweist.

## 5.5. Validierung des Modells

### 5.5.1. Abgleich des Standards des Modells und Anwendungsbeispiels

In der Tabelle 10 ist ein Abgleich des Standards der Standardmodule des Modells mit dem Standard des Anwendungsbeispiels gegeben. Hier zeigt sich zum einen, dass die entwickelten Standardmodule den überwiegenden Teil der Baukonstruktion des Anwendungsbeispiels abdecken können und zum anderen, dass die berücksichtigten Bauweisen des Modells mit den Bauweisen des Anwendungsbeispiels bei neun von 13 abgeglichenen Bauteilen übereinstimmen.

Bauteil	Bauweise Standardmodule des Modells	Bauweise Anwendungsbeispiel
Baugrube	Böschung/Spundwandverbau	Überwiegend mit Böschung
Gründung	Bodenplatte aus Stahlbeton	Bodenplatte aus Stahlbeton
Decken	Stahlbeton	Stahlbeton
Unterirdische Außenwände	Stahlbeton	Stahlbeton
Oberirdische Außenwände	Stahlbeton	Stahlbeton
Innenstützen	Stahlbeton	Stahlbeton
Unterirdische Außenwandbekleidungen	Schaumglasplatten	Polystyrol-Hartschaumplatten
Oberirdische Außenwandbekleidungen	WDVS mit Mineralwolle	WDVS mit Steinwolleplatten
Dach	Flachdach	Geneigtes Dach (Tonnendach im Polygon)
Nichttragende Innenwände	Mauerwerk aus Kalksandstein	Metallständer mit beidseitig doppelter Gipskartonplattenbeplankung
Deckenbeläge	Zementestrich auf Trittschalldämmung	Zementestrich auf Trittschalldämmung
Fenster	Kunststofffenster	Kunststofffenster
Balkone	Kein Standardmodul vorhanden	Stahlbetonplatte

Tabelle 10 Vergleich der Bauweisen der Standardmodule des Modells und des Anwendungsbeispiels, eigene Darstellung

### Ergebnis

### **5.5.2. Vergleich der Herstellungskosten des Modells mit Realbeispiel**

Die Abbildung 50 stellt die Kostenberechnung des Anwendungsbeispiels und die Herstellungskosten dar, die sich bei der Anwendung des Modells ergeben. Aufgrund der unterschiedlichen Kostenstände ist die ursprüngliche Kostenberechnung des Anwendungsbeispiels mit Kostenstand Dezember 2015 auf den Kostenstand des Modells (November 2021) bereinigt worden. Die mittig dargestellte Kostenberechnung berücksichtigt eine Inflationsrate der Verbraucherpreise von 10,5 % (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2022).

Bei dem Vergleich der Herstellungskosten des Modells mit der preisbereinigten Kostenberechnung des Anwendungsbeispiels zeigen sich bei der Baukonstruktion, untergliedert nach der 2. Gliederungsebene gemäß DIN 276:2018-12, unterschiedliche Abweichungen. Die Herstellungskosten der Baugrube gemäß Modell führen zu Kosten, die 71 % höher als die preisbereinigten Herstellungskosten des Anwendungsbeispiels sind. Bei den weiteren Bauteilen sind die ausgegebenen Herstellungskosten des Modells niedriger als bei dem Anwendungsbeispiel. Insgesamt sind die Herstellungskosten des Modells 14 % bzw. 538 Tausend-€ niedriger als die preisbereinigte Kostenberechnung des Anwendungsbeispiels. Die in der Abbildung 50 aufgezeigten Abweichungen in Prozent sollten bei der Anwendung des Modells projektspezifisch bewertet und ggf. durch Ab- bzw. Aufschläge in den Herstellungskosten berücksichtigt werden.

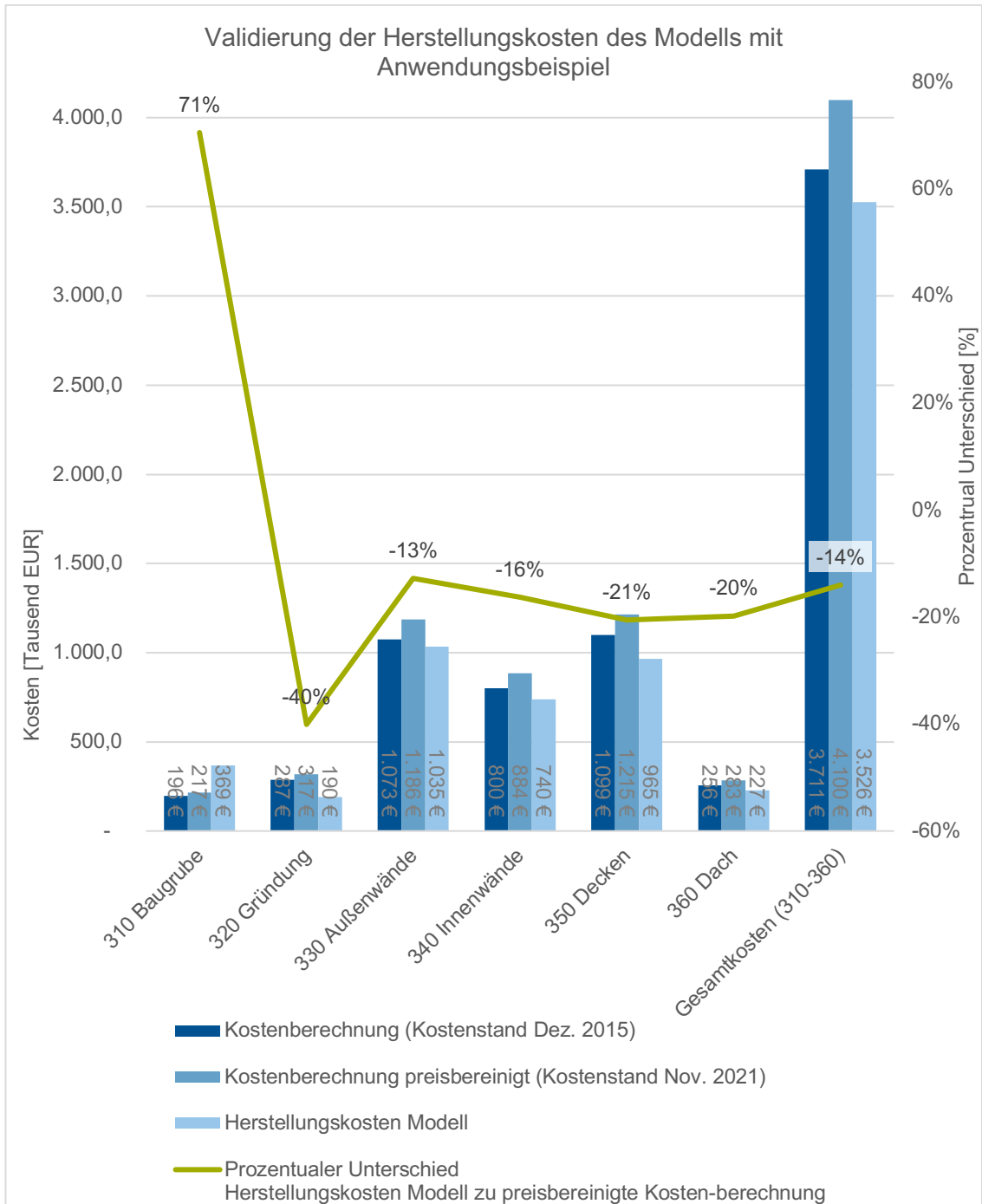


Abbildung 50 Validierung der Herstellungskosten des Modells mit Anwendungsbeispiel, eigene Darstellung

## 6. Schlussbemerkungen

### 6.1. Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Modell für die Baukonstruktion von Wohngebäuden entwickelt, mit dem es möglich ist, in frühen Konzeptions- und Planungsphasen mittels neun Eingabeparametern den Verbrauch von grauer Energie, die fossilen Treibhausgasemissionen und die Lebenszykluskosten zu ermitteln. Die erforderlichen Eingabeparameter sind ohne Fachwissen im Bauwesen verständlich und erlauben somit die Anwendung durch einen breiten Personenkreis.

Das Modell beinhaltet zum einen die Standardbauweise der Baukonstruktion und zum anderen Module der Baukonstruktion in alternativer Bauweise. Zur Entwicklung des Standards und der Alternative wurden Fachliteratur und aktuell gültige Normen herangezogen, sodass das Modell dem aktuellen Stand der Technik entspricht. Als Standard betrachtet das Modell die Massivbauweise in Stahlbeton und als Alternative die Holzbauweise. Beide Varianten werden durch das Modell in Relation zueinander gesetzt und ermöglichen es die Auswirkungen durch eine veränderte Bauweise auf die Ausgabewerte aufzuzeigen.

Als weiteres Element berechnet das Modell CO<sub>2</sub>-Steuern. Dabei wird von einer fiktiven CO<sub>2</sub>-Steuer auf fossile Treibhausgasemissionen ausgegangen, die weltweit in gleicher Weise erhoben wird. Es werden drei unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Preise angesetzt. Ein CO<sub>2</sub>-Preis von 25 € pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq., was der CO<sub>2</sub>-Bepreisung von fossiler Endenergie in Deutschland im Jahr 2021 entspricht. Als zweiter CO<sub>2</sub>-Preis werden 55 € pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. berücksichtigt, was der CO<sub>2</sub>-Preis auf fossile Endenergie im Jahr 2025 in Deutschland sein wird. Als letzter CO<sub>2</sub>-Preis wurden 130 € pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. zu Grunde gelegt, welcher auf einer Studie von der Expertengruppe der Mercator Stiftung und des Potsdam-Institut für Klimaforschung aus dem Jahr 2019 beruht.

Die Anwendung des Modells anhand eines Realbeispiels, welches in den Jahren 2015 bis 2018 in München geplant und realisiert wurde, hat nachfolgende Ergebnisse hervorgebracht.

### **6.1.1. Graue Energie**

Die alternative Bauweise der tragenden Innenstützen hat über den gesamten Lebenszyklus einen um 136,6 % höheren Verbrauch von grauer Energie als die Standardbauweise in Stahlbeton. Auch der alternative Ausbau der Aufenthalts- und Küchenräume zeigt einen höheren Verbrauch von grauer Energie, der aber mit 9,0 % gegenüber dem Standard vernachlässigbar gering ausfällt. Zurückzuführen ist das hauptsächlich auf die zusätzlichen Maßnahmen, die insbesondere aufgrund der Brand- und Schallschutzmaßnahmen umzusetzen sind.

Bei den End-of-Life-Potenzialen (Phase D) hinsichtlich grauer Energie sind alle Alternativmodule, außer der Ausbau der Aufenthalts- und Küchenräume, besser als die Standardmodule. Das größte Potenzial zur Einsparung bzw. Substitution des Verbrauchs von grauer Energie besitzen die Geschossdecken aus Massivholz.

Wird das Gebäude als Ganzes betrachtet, so verbraucht die Alternativbauweise insgesamt 6,1 % weniger graue Energie als die Standardbauweise. Der Unterschied beider Bauweisen fällt eher gering aus, was durch die zugrundeliegenden Datensätze der ÖKOBAUDAT begründet werden kann. Darin sind hohe Energieverbräuche für den Trocknungsprozess des Holzes berücksichtigt.

Die Phase D der Alternativbauweise weist ein deutlich höheres End-of-Life-Potenzial von 706,0 % im Vergleich zur Standardbauweise auf.

Durch die Verwendung der generischen Datensätze der ÖKOBAUDAT zeigt sich innerhalb der Systemgrenzen (Phasen A-C) kein signifikanter Unterschied der beiden Bauweisen bei dem Verbrauch von grauer Energie. Das muss nicht allgemeingültig für die beiden Bauweisen gelten. So kann sich bei der Verwendung von spezifischeren Datensätzen ein deutlicher Unterschied zwischen den Bauweisen ergeben. Das zeigt die direkte Abhängigkeit des Modells von der Datengrundlage sowie -qualität auf.

### **6.1.2. Fossile Treibhausgasemissionen**

Die Anwendungsergebnisse zu den fossilen Treibhausgasemissionen zeigen ähnliche Verhältnisse wie bei der Auswertung des Verbrauchs von grauer Energie auf.

## **Schlussbemerkungen**

Die tragenden Innenstützen in Holzbauweise weisen 71 % mehr Emissionen als in Massivbauweise auf. Das liegt in erster Linie an den Anschlussstellen aus Stahl, die in den generischen Datensätzen der ÖKOBAUDAT hohe Emissionswerte beinhalten.

Durch die Substitution der Decken aus Stahlbeton mit den alternativen Decken wird die größte Einsparung auf Bauteilebene erzeugt. In Hinblick auf das Gebäude werden 15,2 % der gesamten fossilen Treibhausgasemissionen vermieden.

Bei Betrachtung der fossilen Treibhausgasemissionen zeigt sich hinsichtlich des End-of-Life-Potenzials bei allen Alternativmodulen, bis auf dem Ausbau der Aufenthalts- und Küchenräume, ein besseres Ergebnis als bei den Standardmodulen. Das höchste Potenzial zur Einsparung von fossilen Treibhausgasemissionen besitzen die alternativen Geschossdecken im Vergleich zur Standardbauweise.

Das Gebäude in Alternativbauweise weist 25,2% weniger fossile Treibhausgasemissionen innerhalb der Systemgrenze (Phasen A-C) als in Standardbauweise auf. Verglichen mit der Auswertung des Verbrauchs der grauen Energie zeigt sich, dass die Holzbauweise einen deutlichen Unterschied zur Standardbauweise besitzt. Auch hierbei ist die Verwendung von generischen Datensätzen der ÖKOBAUDAT zu berücksichtigen.

Das End-of-Life Potenzial des Gebäudes in alternativer Bauweise ist im Gegensatz zum Standard um 752,0 % höher.

Die Betrachtung von nur einem Umweltwirkindikator, wie dem Verbrauch von grauer Energie, zeigt, dass die Holzbauweise innerhalb der Systemgrenzen (Phasen A-C) sich nicht signifikant besser als die Massivbauweise in Stahlbeton erweist. Erst bei der Berücksichtigung von weiteren Indikatoren, wie hier der fossilen Treibhausgasemissionen, zeigt sich, dass die Alternative in anderen Umweltwirkkategorien deutlich bessere Werte beinhaltet. Daraus ist zu folgern, dass bei einer Bewertung von ökologischen Aspekten immer mehrere Indikatoren heranzuziehen sind, um eine ganzheitliche Entscheidung treffen zu können.

### **6.1.3. Lebenszykluskosten**

Die Auswertung der Herstellungskosten ergibt, dass fünf der sieben Alternativmodule teurer sind als die Standardmodule. Einzig die Attika und die tragenden Innenstützen ergeben in alternativer Bauweise niedrigere Herstellungskosten im Vergleich zu den äquivalenten Standardmodulen. Beim Vergleich des ganzen Gebäudes ergeben sich

### **Schlussbemerkungen**

bei der Alternativbauweise 22,1 % höhere Herstellungskosten als bei der Standardbauweise. Hierbei ist zu betonen, dass insbesondere die Baupreise im Zusammenhang mit Holz im Jahr 2021 eine hohe Inflation erfahren haben.

Die Validierung der ausgegebenen Herstellungskosten des Modells und der preisbereinigten Kostenberechnung des Anwendungsbeispiels hat ergeben, dass das Modell um 14 % niedrigere Werte berechnet. Der Kostenunterschied ist entweder darauf zurückzuführen, dass das Modell ca. 10-20 % der Baukonstruktion nicht vollständig abbildet oder die Einheitspreise aus der Baupreisdatenbank zu niedrig sind. Um dem Unterschied gerecht zu werden, sollte bei der Anwendung des Modells ein Kostenaufschlag von 14 % vorgenommen werden.

Werden ausschließlich die Instandsetzungskosten betrachtet, so zeigen sich bei allen Alternativmodulen höhere oder gleich hohe Kosten für die Ersatzinstandsetzungen. Lediglich die Attika in Holzbauweise ist marginal günstiger. Grundsätzlich sind keine signifikanten Unterschiede bei den Instandsetzungskosten zu sehen. Insgesamt auf das Gebäude bezogen sind die Instandsetzungskosten der Alternative um 9,6 % höher als beim Standard.

Da bei der Berücksichtigung der Bauteillebensdauern keine normative Vorgehensweise vorgegeben ist, können sich bei der Verwendung von anderen Tabellen als die hier genutzte Tabelle des BNB unterschiedliche Ausgabewerte der Instandsetzungskosten ergeben.

Hinsichtlich der Kosten für den Abbruch und die Verwertung des Bauwerks ermittelt das Modell bei allen Alternativmodulen, außer bei dem Ausbau der Aufenthalts- und Küchenräume, niedrigere Abbruch- und Verwertungskosten. Das Standardmodul des Ausbaus der Aufenthalts- und Küchenräume ist marginal mit 1,2 % günstiger als das Alternativmodul. Das größte Kosteneinsparpotenzial hinsichtlich Abbruchkosten in absoluten Zahlen weisen die Geschosdecken und Außenwände der Alternativbauweise auf. Für das Gesamtgebäude in Holzbauweise dokumentiert das Modell 24,1 % niedrigere Kosten gegenüber der Stahlbetonbauweise.

Auf den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes gesehen, unterscheiden sich die Kosten beider Bauweisen nur gering. Die Alternativbauweise führt zu 1,9 % höheren Lebenszykluskosten als die Standardbauweise.

#### **Schlussbemerkungen**



So zeigt sich bei der kombinierten Betrachtung von Umweltwirkindikatoren und Lebenszykluskosten, dass die Substitution von Teilen der Baukonstruktion mit Alternativen in Holzbauweise zu um 1,9 % höheren Lebenszykluskosten führt, dagegen aber der Verbrauch von grauer Energie um 6,1 % und die fossilen Treibhausgasemissionen um 25,2 % gesenkt werden können.

Ein sinnvoller monetärer Vergleich von unterschiedlichen Bauweisen kann nur unter Berücksichtigung der Herstellungs-, der Instandsetzungs- sowie der Abbruch- und Verwertungskosten erfolgen. Ansonsten kommt es zu einer Vernachlässigung der hohen Abbruch- und Verwertungskosten zugunsten der Standardbauweise. So wird empfohlen, dass bei Vergleichen von Bauweisen immer die Lebenszykluskosten betrachtet und ins Verhältnis gesetzt werden.

#### **6.1.4. CO<sub>2</sub>-Steuer**

Die Ermittlung einer fiktiven CO<sub>2</sub>-Besteuerung der fossilen Treibhausgase innerhalb der Systemgrenzen (Phasen A-C) führt bei allen Standardmodulen, außer bei den tragenden Innenstützen, zu einer höheren Steuerbelastung als bei den Alternativmodulen. Den größten Steuervorteil gegenüber der Standardbauweise hätten die alternativen Decken mit 70 % weniger CO<sub>2</sub>-Steuern.

Wird ein CO<sub>2</sub>-Preis von 130 € pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. berücksichtigt, so würden die Lebenszykluskosten der Standardbauweise um 0,23 Mio. € für CO<sub>2</sub>-Steuern von 7,3 Mio. € auf 7,53 Mio. € steigen. Dagegen steigen die Lebenszykluskosten der Alternative um 0,17 Mio. € von 7,44 Mio. € auf 7,61 Mio. €. Die zusätzliche CO<sub>2</sub>-Besteuerung hat also zur Folge, dass der prozentuale Unterschied der Gesamtlebenszykluskosten und CO<sub>2</sub>-Steuern um 0,8 %-Punkte von 1,9 % auf 1,1 % sinkt. Würde bei einer CO<sub>2</sub>-Steuer auch die Phase D mit einbezogen werden, so sinkt der Gesamtkostenunterschied um weitere 0,7 %-Punkte auf 0,4 %.

Auf Basis der ermittelten Werte für das Anwendungsbeispiel lässt sich ein alternativer CO<sub>2</sub>-Preis berechnen, ab dem die Holzbauweise unter Berücksichtigung der fossilen Treibhausgasemissionen der Phasen A-C geringere Gesamtkosten aufweist als die Standardbauweise. Folglich würde ab einem CO<sub>2</sub>-Preis von mehr als 255 € das Gebäude in Alternativbauweise geringere Gesamtkosten aufweisen als das Gebäude in Standardbauweise. Aus klimapolitischer Sicht wird deshalb zu einer weltweit erhobenen CO<sub>2</sub>-Steuer von mindestens 255 € pro Tonne fossiler Treibhausgase geraten.

#### **Schlussbemerkungen**

Mit Bezug auf die vorliegenden Ergebnisse wird die zu Beginn der Arbeit beschriebene Hypothese:

***„Je mehr Bauteile der Baukonstruktion von Wohngebäuden durch Holzbauteile ersetzt werden, desto geringer werden, unter der Annahme einer weltweiten CO<sub>2</sub>-Steuer, die Lebenszykluskosten, die Verbräuche von grauer Energie sowie die fossilen Treibhausgasemissionen.“***

bestätigt, wenn ein weltweit erhobener CO<sub>2</sub>-Preis von mindestens 255 € pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äq. umgesetzt wird.

## 6.2. Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Als weiterer Forschungsbedarf wird die Weiterentwicklung des Modells gesehen. Eine Erweiterung des Modells mit Modulen, die auf repräsentativere Datensätze beruhen, könnten dazu genutzt werden, dass statt der Ausgabe von absoluten Zahlenwerten, eine Spanne von Werten angegeben wird. Das würde dem Stand von frühen Konzeptions- und Planungsphasen gerecht werden.

Neben dem Modell besteht stetiger Bedarf weitere Ökobilanzen von Bauprodukten zu entwickeln, die als Grundlage für solche Modelle genutzt werden können. Denn je besser die Datengrundlage ist desto besser sind die darauf basierenden Arbeiten.

Weiter wäre es von Interesse zu ermitteln, wie hoch die mit den Bauweisen verbundenen Umweltkosten sind. So könnte ein Abgleich mit dem hier ermittelten CO<sub>2</sub>-Preis von 255 € durchgeführt und eine Aussage darüber getroffen werden, ob dieser CO<sub>2</sub>-Preis die Umweltkosten abdecken würde.

Des Weiteren würde eine Erweiterung des Modells mit weiteren Nutzungen und Bauweisen zu einer besseren Entscheidungsgrundlage für Investitionsentscheidungen führen.

## 7. Literaturverzeichnis

- Bach, S., Isaak, N., Kemfert, C., Kunert, U., Schill, W.-P., Schmalz, S., Wagner, N., & Zaklan, A. (2019a). *CO2-Bepreisung im Wärme-und Verkehrssektor: Diskussion von Wirkungen und alternativen Entlastungsoptionen*. DIW Berlin: Politikberatung kompakt.
- Bach, S., Isaak, N., Kemfert, C., Kunert, U., Schill, W.-P., Wagner, N., & Zaklan, A. (2019b). *Für eine sozialverträgliche CO2-Bepreisung*. DIW Berlin: Politikberatung kompakt.
- BBSR. (2020). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) Referat Bauingenieurwesen, Nachhaltiges Bauen, Bauforschung,. Abgerufen am 05.02.2022 von <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/service/impressum/>
- BBSR. (2021a). *ÖKOBAUDAT*. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. Abgerufen am 09.09.2021 von <https://www.oekobaudat.de>
- BBSR. (2021b). *ÖKOBAUDAT Version 2021-II*. In OBD\_2021\_II-2.csv (Ed.). Bonn: Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat.
- BBSR. (2021c). *ÖKOBAUDAT-Handbuch - Technisch/formale Informationen und Regeln zur ÖKOBAUDAT-Datenbank - Version 2.1*. In. Berlin: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).
- BBSR. (2022). *Nutzungsdauern von Bauteilen*. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. Abgerufen am 30.01.2022 von <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/>
- Bundesverfassungsgericht. (2021). *Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich* <https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html>
- Deutscher Bundestag. (2021). *Drucksache 19/30230 Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes*. Web Retrieved from <https://dserver.bundestag.de/btd/19/302/1930230.pdf>
- DGNB GmbH. (2022). *DGNB Kriterium "Ökobilanz des Gebäudes"*. DGNB GmbH. Abgerufen am 05.02.2022 von <https://www.dgnb-system.de/de/gebaeude/neubau/kriterien/oekobilanz-des-gebaeudes/index.php>
- DIN e. V. (2019). DIN 31051:2019-06. Grundlagen der Instandhaltung. In. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN e. V. (2020a). DIN 18960:2020-11. Nutzungskosten im Hochbau. In. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN e. V. (2020b). DIN EN 15804:2020-03. In. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN e.V. (2011). DIN EN ISO 14025:2011-10. Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen – Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14025:2011. In. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN e.V. (2012). DIN 4124:2012-01. Baugruben und Gräben – Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten. In. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN e.V. (2013). DIN 4108-2:2013-02. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. In. Berlin: Beuth-Verlag.

- DIN e.V. (2017). DIN 18157-1:2017-04. Ausführung von Bekleidungen und Belägen im Dünnbettverfahren – Teil 1: Zementhaltige Mörtel. In. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN e.V. (2018). DIN 276:2018-12. Kosten im Bauwesen. In. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN e.V. (2020). DIN EN 15804:2020-03. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019. In. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN e.V. (2021a). DIN EN ISO 14040:2021-02. Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. In. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN e.V. (2021b). DIN EN ISO 14044:2021-02. Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. In. Berlin: Beuth-Verlag.
- Dudenverlag. (2022). *Modul, das*. Bibliographisches Institut GmbH. Abgerufen am 22.01.2022 von [https://www.duden.de/rechtschreibung/Modul\\_Element\\_Lehreinheit](https://www.duden.de/rechtschreibung/Modul_Element_Lehreinheit)
- ecoinvent. (2022). *About ecoinvent*. ecoinvent. Abgerufen am 05.02.2022 von <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-association/>
- Edenhofer, O., Flachsland, C., Kalkuhl, M., Knopf, B., & Pahle, M. (2019). Optionen für eine CO2-Preisreform. MCC-PIK-Expertise für den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung.
- Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the energy performance of buildings (recast), (2021).
- f:data GmbH. (2022). *Übersicht baupreislexikon*. f:data GmbH. Abgerufen am 30.01.2022 von <https://www.baupreislexikon.de>
- Frischknecht, R. (2020). *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Springer Spektrum.
- Goris, A. (2018). 12 C Stahlbetonbau nach Eurocode 2. In K.-J. Schneider & A. Albert (Hrsg.), *Bautabellen für Architekten* (23. Auflage, 12.28-12.88). Bundesanzeiger Verlag.
- Grütter, J. K. (2021). *WOHNRAUM Planen: Architektur - Psychologie - Sozial - Gesellschaft - Kultur*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Hestermann, U., & Rongen, L. (2015). *Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1*. Vieweg +Teubner.
- Hestermann, U., & Rongen, L. (2018). *Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 2*. Vieweg +Teubner
- Springer Vieweg.
- Hillebrandt, A. (2018). Architekturkreisläufe – Urban-Mining-Design. In *Atlas Recycling - Gebäude als Materialressource* (1. Auflage, S. 10-15). Detail Business Information GmbH.
- Hillebrandt, A., & Seggewies, J.-K. (2018). Recyclingpotenziale von Baustoffen. In *Atlas Recycling - Gebäude als Materialressource* (1. Auflage, S. 58-101). Detail Business Information GmbH.
- Holzforchung Austria. (2022). *Innenwand iwrxo10b*. dataholz.eu. Abgerufen am 28.01.2022 von <https://www.dataholz.eu/bauteile/innenwand/detail/kz/iwrxo10b.htm>
- Hort, B. (2018). 8 D Facility Management. In K.-J. Schneider & A. Albert (Hrsg.), *Bautabellen für Architekten* (23. Auflage, 8.94-98.104). Bundesanzeiger Verlag.
- International Energy Agency (IEA). (2020). *Energy Technology Perspectives 2020*.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental*

- Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, Issue. Cambridge University Press)
- ISO. (2017). ISO 15686-5:2017(E). Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing. In. Genf (CH).
- Kaufmann, H., Krötsch, S., & Winter, S. (2017). *Atlas mehrgeschossiger Holzbau*. Detail Business Information GmbH.
- Kemfert, C., Evert, J., Holzmann, S., & Priem, M. (2021). Grenzen einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung - Dekarbonisierungsmaßnahmen jenseits eines CO<sub>2</sub>-Preises. In Greenpeace e.V. (Ed.). Hamburg.
- KfW. (2020). Anlage zum Merkblatt Energieeffizient Bauen - Technische Mindestanforderungen. In. Web.
- KfW. (2022). *Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) - Sofortiger Antrags- und Zusagestopp*. KfW. Abgerufen am 31.01.2022 von <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Bundesfoerderung-fuer-effiziente-Gebaeude/>
- KLH Massivholz GmbH. (2020). Vorbemessungstabellen. In. Teufenbach-Katsch (A): KLH Massivholz GmbH,.
- König, H. (2022). *Erstellung von Ökobilanzen*. Informationsverein Holz e.V. Abgerufen am 05.02.2022 von <https://informationsdienst-holz.de/urbaner-holzbau/kapitel-3-zukunftsaehiger-baustoff/die-erstellung-von-oekobilanzen>
- König, H., Kohler, N., Kreißig, J., & Lützkendorf, T. (2012). *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung*. DETAIL. <https://doi.org/doi:10.11129/detail.9783955530129>
- Kornblum, F. S. (2018). *Bestimmung von Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von Grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien* Technische Universität München]. München.
- Krebs, J. (2017). *Basics Entwerfen und Wohnen*. Birkhäuser. <https://doi.org/doi:10.1515/9783035611052>
- (2019). [https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Rechtsgrundlagen/MBO\\_2019.pdf](https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Rechtsgrundlagen/MBO_2019.pdf)
- Munich Re. (2022). *Extremwetter vernichtet Milliardenwerte*. Munich Re. Abgerufen am 05.02.2022 von <https://www.munichre.com/de/risiken/extremwetter.html>
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. (2019). *CO<sub>2</sub>-Bepreisung* <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/co2-bepreisung-1673008>
- Püschel, D., & Teller, M. (2013). *Umweltgerechte Baustoffe*. Fraunhofer IRB Verl.
- Rosen, A. (2018). Bewertungssysteme im Überblick. In *Atlas Recycling - Gebäude als Materialressource* (1. Auflage, S. 24-31). Detail Business Information GmbH. <http://shop.detail.de/de/atlas-recycling.html>
- Scholz, S. (2019). Kostenermittlungen nach DIN 276. In *Architekturpraxis Bauökonomie: Grundlagenwissen für die Planungs-, Bau- und Nutzungsphase sowie Wirtschaftlichkeit im Planungsbüro* (2. Auflage, S. 49-76). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Schweizer Ingenieur- und Architektenverein. (2010). Graue Energie von Gebäuden 2032. In. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- Sphera Solutions GmbH. (2022). *GaBi LCA Datenbanken*. Sphera Solutions, Inc. Abgerufen am 05.02.2022 von <https://gabi.sphera.com/deutsch/datenbanken/gabi-datenbanken/>
- Statistisches Bundesamt (Destatis). (2021). *Starke Preisanstiege bei Baustoffen im Jahr 2021*. Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 03.02.2022 von [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/07/PD21\\_N044\\_61.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/07/PD21_N044_61.html)

- Statistisches Bundesamt (Destatis). (2022). *Preisstatistik im Überblick*. Statistisches Bundesamt (Destatis). Abgerufen am 28.01.2022 von [https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Ueberblick/\\_inhalt.html#sprg470458](https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Ueberblick/_inhalt.html#sprg470458)
- The World Bank. (2021). *State and Trends of Carbon Pricing 2021*. In. Washington DC: International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- Tripler, K. (2018). 8 C Kostenplanung; Wertermittlung; Honorarordnung. In A. Albert & J. P. Heisel (Hrsg.), *Bautabellen für Architekten* (23. Auflage, S. 8.51). Bundesanzeiger Verlag.
- Umweltbundesamt. (2021a). *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*. Abgerufen am 08.09.2021 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>
- Umweltbundesamt. (2021b). *UBA-Erklärfilm zum deutschen Emissionshandel für Brennstoffe* [Youtube]. Umweltbundesamt; <https://youtu.be/IMtb9FkkaHE>
- Umweltbundesamt. (2022). *Willkommen bei ProBas!* Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), dieses vertreten durch den Präsidenten des Umweltbundesamtes. Abgerufen am 05.02.2022 von <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>
- VELUX Deutschland GmbH. (2022). *Optimale Fenstergröße berechnen: Wie viel Fensterfläche brauche ich für ausreichend Tageslicht?* Abgerufen am 05.02.2022 von <https://magazin.velux.de/de-DE/artikel/fenstergroesse-berechnen>

## 8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Vergleich von Mehrfamilienhäusern mit unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards gegliedert nach Herstellungs- und Nutzungsphase, (Kaufmann et al., 2017, S. 27) .....	2
Abbildung 2 Lebenszykluskosten im weiteren Sinn gemäß ISO 15686-5:2017(E), eigene Darstellung nach ISO (2017, S. 7) und König et al. (2012, S. 60).....	20
Abbildung 3 Muster des Moduldatenblatts, eigene Darstellung .....	29
Abbildung 4 Verschiedene Bausysteme, (Hestermann & Rongen, 2015, S. 243) .....	36
Abbildung 5 Herstellungsprozess Standardmodul Baugrube mit Böschung, eigene Darstellung .....	40
Abbildung 6 Herstellungsprozess Standardmodul Baugrube mit Spundwandverbau, eigene Darstellung .....	41
Abbildung 7 Herstellungsprozess Standardmodul Bodenplatte aus WU-Beton, eigene Darstellung .....	43
Abbildung 8 Herstellungsprozess Standardmodul Geschossdecke, eigene Darstellung .....	44
Abbildung 9 Nutzungskategorien nach DIN EN 1991-1-1 mit Angabe der anzurechnenden Nutzlasten im Hochbau, (Hestermann & Rongen, 2015, S. 365)....	44
Abbildung 10 Herstellungsprozess Standardmodul Dachgeschossdecke, eigene Darstellung .....	45
Abbildung 11 Herstellungsprozess Standardmodul Attika, eigene Darstellung .....	45
Abbildung 12 Herstellungsprozess Standardmodul Dachbeläge, eigene Darstellung ..	46
Abbildung 13 Schematischer Aufbau des einschaligen Flachdachs, Hestermann und Rongen (2018, S. 284).....	47
Abbildung 14 Herstellungsprozess Standardmodul tragende Außenwand der unterirdischen Geschosse, eigene Darstellung.....	49
Abbildung 15 Herstellungsprozess Standardmodul tragende Außenwände der oberirdischen Geschosse, eigene Darstellung.....	50
Abbildung 16 Herstellungsprozess Standardmodul Der tragenden Innenstützen in allen Geschossen, eigene Darstellung .....	51
Abbildung 17 Herstellungsprozess Standardmodul Außenwandbekleidungen der unterirdischen Geschosse, eigene Darstellung.....	52
Abbildung 18 Herstellungsprozess Standardmodul Außenwandbekleidungen der oberirdischen Geschosse, eigene Darstellung.....	53
Abbildung 19 Herstellungsprozess Standardmodul Treppenhaus, eigene Darstellung .....	55
Abbildung 20 Schematischer Treppengrundriss, (Hestermann & Rongen, 2018, S. 378).....	55
Abbildung 21 Regelquerschnitt Decken der Aufenthalts- und Küchenräume sowie Wohnungseingangsbereiche, (Hestermann & Rongen, 2015, S. 447) .....	57
Abbildung 22 Herstellungsprozess Standardmodul Aufenthalts- und Küchenräume sowie Wohnungseingangsbereiche - Deckenbeläge, eigene Darstellung .....	57
Abbildung 23 Herstellungsprozess Standardmodul Aufenthalts- und Küchenräume, Nassräume sowie Wohnungseingangsbereiche - Deckenbekleidungen, eigene Darstellung .....	57
Abbildung 24 Herstellungsprozess Standardmodul Aufenthalts- und Küchenräume sowie Wohnungseingangsbereiche - Innenwände und Innenwandbekleidungen, eigene Darstellung .....	58

Abbildung 25 Aufbau Verbundabdichtung mit keramischen Fliesen in Nassräumen, (Hestermann & Rongen, 2015, S. 427) .....	59
Abbildung 26 Herstellungsprozess Standardmodul Nassräume - Innenwände und Innenwandbekleidungen, eigene Darstellung .....	60
Abbildung 27 Herstellungsprozess Standardmodul Nassräume - Bodenbeläge, eigene Darstellung .....	60
Abbildung 28 Herstellungsprozess Alternativmodul Geschossdecken, eigene Darstellung .....	62
Abbildung 29 Herstellungsprozess Alternativmodul Dachgeschossdecke, eigene Darstellung .....	62
Abbildung 30 Herstellungsprozess Alternativmodul Attika, eigene Darstellung .....	62
Abbildung 31 Herstellungsprozess Alternativmodul Außenwände der oberirdischen Geschosse, eigene Darstellung .....	63
Abbildung 32 Herstellungsprozess Alternativmodul tragende Innenstützen, eigene Darstellung .....	64
Abbildung 33 Regelquerschnitt Massivholzwände mit WDVS, (Kaufmann et al., 2017, S. 102) .....	65
Abbildung 34 Herstellungsprozess Alternativmodul Außenwandbekleidungen der oberirdischen Geschosse, eigene Darstellung .....	65
Abbildung 35 Bauteilaufbau Alternative Innenwand, (Holzforschung Austria, 2022) ..	66
Abbildung 36 Herstellungsprozess Alternativmodul Aufenthalts- und Küchenräume - Innenwände, eigene Darstellung .....	67
Abbildung 37 Herstellungsprozess Alternativmodul Aufenthalts- und Küchenräume - Böden, eigene Darstellung .....	67
Abbildung 38 Herstellungsprozess Alternativmodul Aufenthalts- und Küchenräume - Decken, eigene Darstellung .....	68
Abbildung 39 Anwendungsmethodik des Modells, eigene Darstellung .....	79
Abbildung 40 Eingabemaske des Modells, eigene Darstellung .....	79
Abbildung 41 Graue Energie gegliedert nach Modulen, eigene Darstellung .....	84
Abbildung 42 Graue Energie gegliedert nach Bauweise und Lebenszyklusphasen, eigene Darstellung .....	85
Abbildung 43 Fossile Treibhausgasemissionen gegliedert nach Modulen, eigene Darstellung .....	86
Abbildung 44 Fossile Treibhausgasemissionen gegliedert nach Bauweise und Lebenszyklusphasen, eigene Darstellung .....	87
Abbildung 45 Kosten gegliedert nach Lebenszyklusphasen und Modulen, eigene Darstellung .....	89
Abbildung 46 Lebenszykluskosten (Phasen A-C) gegliedert nach Modulen, eigene Darstellung .....	91
Abbildung 47 Kosten gegliedert nach Lebenszyklusphasen und Bauweisen, eigene Darstellung .....	92
Abbildung 48 CO <sub>2</sub> -Steuern gegliedert nach CO <sub>2</sub> -Preisansätzen und Modulen, eigene Darstellung .....	94
Abbildung 49 Lebenszykluskosten gegliedert nach enthaltenen CO <sub>2</sub> -Steuern, eigene Darstellung .....	95
Abbildung 50 Validierung der Herstellungskosten des Modells mit Anwendungsbeispiel, eigene Darstellung .....	99



## 9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Lebenszyklusphasen von Bauwerken nach DIN EN 15804:2020-03, (DIN e. V., 2020b, S. 17) .....	10
Tabelle 2 Begriffe zur Beschreibung des Verbrauchs von Primärenergie entsprechend EN 15804:2012+A2:2019, (DIN e.V., 2020, S. 46) .....	14
Tabelle 3 Übersicht der Kostenermittlungsarten und -genauigkeiten in den Planungsphasen, eigene Darstellung nach Tripler (2018, S. 8.52), König et al. (2012, S. 67) und Scholz (2019, S. 71) .....	16
Tabelle 4 Zweite und dritte Gliederungsebenen der KG 300 gemäß DIN 276:2018-12, (DIN e.V., 2018, S. 17-23).....	18
Tabelle 5 Gebäudeklassen gemäß MBO, (MBO, 2019, § 2, Abs. 3 und 4) .....	32
Tabelle 6 Übersicht Bauteile/-leistungen ohne Ökobilanzdaten in der ÖKOBAUDAT, eigene Darstellung .....	73
Tabelle 7 Übersicht der entwickelten Module mit Gegenüberstellung der enthaltenen KG nach DIN 276:2018-12, eigene Darstellung .....	77
Tabelle 8 Übersicht der Wohneinheiten des Anwendungsbeispiels, eigene Darstellung .....	81
Tabelle 9 Übersicht der Wohnungsgröße der Wohneinheiten des Anwendungsbeispiels, eigene Darstellung .....	81
Tabelle 10 Vergleich der Bauweisen der Standardmodule des Modells und des Anwendungsbeispiels, eigene Darstellung .....	97

## 10. Formelverzeichnis

Formel 1 Vorbemessung Bodenplatte aus Stahlbeton, (Goris, 2018, S. 10.23) .....	42
Formel 2 Vordimensionierung Flachdecke, Goris (2018, S. 10.19) .....	43
Formel 3 Vorbemessung Stützen aus Stahlbeton.....	51

# Anhang A

## **Modulstruktur**





Bezeichnung		Einheit	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100																																																																																																			
101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200																																																																																																						
Werkstoff		001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011	012	013	014	015	016	017	018	019	020	021	022	023	024	025	026	027	028	029	030	031	032	033	034	035	036	037	038	039	040	041	042	043	044	045	046	047	048	049	050	051	052	053	054	055	056	057	058	059	060	061	062	063	064	065	066	067	068	069	070	071	072	073	074	075	076	077	078	079	080	081	082	083	084	085	086	087	088	089	090	091	092	093	094	095	096	097	098	099	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200



Kode/Item/Detail	Uraian Pekerjaan	Kategori Pekerjaan	Tipe Pekerjaan	Struktur dan Rincian Pekerjaan													Luaran dan Pembelian			Kondisi dan Biaya		Keterangan Lain				
				Kode	Nama	Jumlah	Unit	Tingkat 1			Tingkat 2			Tingkat 3			Kode	Jumlah	Unit	Kategori	Kategori					
								01	02	03	04	05	06	07	08	09							10	11	12	13
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...



























Beschreibungsnummer	Beschreibung	Berechnung FGHGT (M) und GWP-Werte (in CO <sub>2</sub> -e) (Glaubwürdigkeit 2) (2)													Kategorie des CO <sub>2</sub> -Äquivalents		
		Emissionen aus fossilen Brennstoffen			Emissionen aus fossilen Brennstoffen			Emissionen aus fossilen Brennstoffen			Gesamt	Gesamt	Gesamt	Gesamt	Gesamt	Gesamt	Gesamt
		SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O							
113	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
114	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
115	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...







Kategorie	Beschreibung	Bilanzierungszeitraum (in Mio. €) (Standort 2024)												Kumuliert CO <sub>2</sub> -Emissionen						
		2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	
A.1	Energieerzeugung	Produktion	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Verbrauch	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A.2	Transport	Produktion	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Verbrauch	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A.3	Industrie	Produktion	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Verbrauch	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A.4	Gebäude	Produktion	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Verbrauch	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A.5	Landwirtschaft	Produktion	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Verbrauch	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A.6	Flugverkehr	Produktion	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Verbrauch	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A.7	Schifffahrt	Produktion	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Verbrauch	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A.8	Sonstige	Produktion	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		Verbrauch	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Gesamt		Produktion	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Gesamt		Verbrauch	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000







## Anhang B

### Übersicht der verwendeten Datensätze aus der ÖKOBAUDAT

Datensatzbezeichnung gemäß ÖKOBAUDAT	Datensatztyp	Referenzjahr	Gültig bis	Verwendung im Modul	Verwendung bei Bauteil/-leistung
Brettsperrholz (Durchschnitt DE)	Repräsentativ	2021	2026	004a, 005a, 009a	Brettsperrholzdecke, -wand
Oriented Strand Board (Durchschnitt DE)	Repräsentativ	2021	2026	101, 101a	Innentür, Innenwandbeplankung
Röhrenspanplatte (Durchschnitt DE)	Repräsentativ	2021	2026	013, 101a	Röhrenspanplatte
Hochdichte Faserplatte (Durchschnitt DE)	Repräsentativ	2021	2026	102	Feuchtraum-/Nassraumtür
Mitteldichte Faserplatte (Durchschnitt DE)	Repräsentativ	2021	2026	009, 009a	Haustür
LKW	Generisch	2021	2022	001, 002, 003, 004, 005, 006, 008, 009, 010, 013	Transport Räumgut, Oberboden, Bodenaushub, Schalung
Bagger 100 kW Aushub	Generisch	2021	2022	001, 002	Baugrube abräumen, Oberboden abtragen, Bodenaushub lösen, Arbeitsraum verfüllen
Befestigungsmittel/Schrauben Edelstahl	Generisch	2021	2022	012	Schraubdübel
Beschlagverbund Fenster Stahl	Generisch	2021	2022	013	Drückergarnitur
Isolierglas 2-Scheiben	Generisch	2021	2022	009, 009a	Isolierglas 2fach
Flügelrahmen PVC-U	Generisch	2021	2022	009	Flügelrahmen PVC
Blendrahmen PVC-U	Generisch	2021	2022	009	Blendrahmen PVC
Holz-Flügelrahmen	Generisch	2021	2022	009a	Flügelrahmen Nadelholz
Holz-Blendrahmen	Generisch	2021	2022	009a	Blendrahmen Nadelholz
Acrylat Dichtmasse	Generisch	2021	2022	102	Elastischer Fugendichtstoff
Bitumen Kaltkleber (60% Bitumen, 23%LM, 17% Wasser)	Generisch	2021	2022	011	Klebe- und Dichtungsmasse auf Bitumenbasis
PE/PP Vlies	Generisch	2021	2022	007	Strukturvliesmatte, Geotextil

Glasvlies	Gene- risch	2021	2022	007, 012, 012a	Trenn-/Ausgleichsschicht Glasvlies, Armierungsgewebe
Dampfbremse PE	Gene- risch	2021	2022	003, 101, 102, 103, 012a, 101a	Trennlage PE-Folie, Abdeck- folie, Luftdichtheitsschicht, Rieselschutz
ECB Kunststoff- Dachbahn nach DIN 16729 (mit PES Vlies)	Gene- risch	2021	2022	003	Fugenbänder Kunststoffbahn,
Dachbahnen EPDM	Gene- risch	2021	2022	006, 007	Elastomerbahn EPDM
PVC-Dachbahnen	Gene- risch	2021	2022	008	Fugenband PVC
Bitumenbahnen V 60	Gene- risch	2021	2022	007, 012, 012a	Bitumenbahn, Trennschicht
PVC Fußbodenbe- lag	Gene- risch	2021	2022	101, 103, 101a	Bodenbelag PVC
Innenfarbe Dispersi- onsfarbe scheuer- fest	Gene- risch	2021	2022	011, 012, 101, 102, 103, 010a, 012a, 101a	Dispersionsfarbe
Fassadenfarbe Sili- kat-Dispersionsfarbe	Gene- risch	2021	2022	012, 012a	Dispersionssilikarfarbe
Stahl warmgewalzte Bleche (2-20mm)	Gene- risch	2021	2022	010a	Stahlteile Stützenfuß, An- schlussknoten
Stahl Feinblech (20µm bandverzinkt)	Gene- risch	2021	2022	101a	Putzträger Rippenstreckmetall
Feuerverzinktes Stahlblech	Gene- risch	2021	2022	006, 012, 006a, 012a	Attikaabdeckungsprofil, Fens- terbankabdeckung
Stahlprofil	Gene- risch	2021	2022	013	Treppengeländer
Bewehrungsstahl	Gene- risch	2021	2022	003, 004, 005, 006, 008, 009, 010, 013	Betonstahlmatte, Betonstab- stahl, Durchstanzbewehrung
Sperrholzplatte (ge- nerisch)	Gene- risch	2021	2022	013	Umfassungszarge Vollholz
Brettschichtholz Na- delholz (generisch)	Gene- risch	2021	2022	010a	Brettschichtholzstütze
Konstruktionsvoll- holz (generisch, 15% Feuchte / 13% H2O)	Gene- risch	2021	2022	006a, 101a	Holzrahmenkonstruktion Kon- struktionsvollholz
Extrudierter Polysty- rol Dämmstoff (XPS)	Gene- risch	2021	2022	101, 102, 103	Trittschalldämmschicht
Polyethylen-Schaum	Gene- risch	2021	2022	013, 101, 102, 103	Trittschalldämmelemente, Randdämmstreifen
Mineralwolle (Bo- den-Dämmung)	Gene- risch	2021	2022	101a	Trittschalldämmschicht
Mineralwolle (Fas- saden-Dämmung)	Gene- risch	2021	2022	006, 012, 006a, 012a, 101a	Attika, WDVS Fassade
Bauschutttaufberei- tung	Gene- risch	2021	2022	001, 002	Oberboden aufbereiten, Bo- denaushub aufbereiten

Bauschutt-Deponierung	Generisch	2021	2022	001, 002	Räumgut entsorgen/deponieren
Fliesenkleber	Generisch	2021	2022	102	Fliesenmörtel
Armierung (Kunstharzspachtel)	Generisch	2021	2022	102	Polymerdispersion
Voranstrich (Silikat-Dispersion)	Generisch	2021	2022	012, 101, 102, 103, 012a	Putzgrund/Grundierung, Haftbrücke
Kalkzement Putzmörtel	Generisch	2021	2022	011, 012, 101, 102, 103, 012a, 101a	Innenputz, Armierungsputz, Oberputz
Zementestrich	Generisch	2021	2022	101, 102, 103, 101a	Zementestrich
Transportbeton C30/37	Generisch	2021	2022	003, 004, 005, 008	Ortbeton WU-Beton Bodenplatte, Außenwände UG, Decken
Transportbeton C20/25	Generisch	2021	2022	003, 006, 009, 013	Ortbeton Sauberkeitsschicht, Attika, Außenwände OG, Treppenhaus
Vegetationssubstrat	Generisch	2021	2022	007	Vegetationstragschicht Blähton
Gipskartonplatte (Feuerschutz, 12,5mm)	Generisch	2021	2022	006a, 010a, 012a, 101a	Gipsplatten Typ DF
Steinzeugfliesen unglasiert	Generisch	2021	2022	102	Fliesen
Betonfertigteil Decke, Dicke 20cm	Generisch	2021	2022	013	Treppenpodestplatte Fertigteil
Betonfertigteil Treppe (1,1 m Breite, 9 Stufen a 16 cm)	Generisch	2021	2022	013	Treppenlauf gerade Fertigteil
Kalksandstein	Generisch	2021	2022	101, 102, 103	Mauerwerk Kalksandstein
Kies 2/32 (getrocknet)	Generisch	2021	2022	101a	Ausgleichsschicht Schüttung Mineralstoff
FOAMGLAS® T4+	Spezifisch	2021	2026	003, 011	Perimeterdämmung Schaumglas

# Anhang C

## Formelsammlung

Formel-Nr.	Anwendung in Modul	Beschreibung der Formel	Formel	Einheit	Hinweise/Annahmen/Anmerkungen
001	001	Fläche - Baugrube auf Höhe Geländeoberkante (GOK) - Baugrube mit Böschung	$=((GB+2*(AUG*GH+0,5))*((GL+2*(AUG*GH+0,5))))$	m <sup>2</sup>	Annahme: Breite Arbeitsraum 0,5 m (gem. DIN 4124)
002	001	Volumen - Räumgut - Baugrube mit Böschung	$=((GB+2*(AUG*GH+0,5))*((GL+2*(AUG*GH+0,5))))*0,5$	m <sup>3</sup>	Annahme: Schichtdicke des Räumguts 50 cm
003	001	Masse - Räumgut - Baugrube mit Böschung - in Tonnen	$=(((GB+2*(AUG*GH+0,5))*((GL+2*(AUG*GH+0,5))))*0,5)*1,3$	t	Annahme: Schichtdicke des Räumguts 50 cm; Umrechnungsfaktor: 1,3 Tonnen pro m <sup>3</sup> bzw. 0,77 m <sup>3</sup> pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung)
004	001	Massentransport - Räumgut - Baugrube mit Böschung	$=(((GB+2*(AUG*GH+0,5))*((GL+2*(AUG*GH+0,5))))*0,5)*1,3*50$	t*km	Annahme: Schichtdicke des Räumguts 50 cm; Umrechnungsfaktor: 1,3 Tonnen pro m <sup>3</sup> bzw. 0,77 m <sup>3</sup> pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung); Annahme: 50 km Transportweg zur Verwertungsstelle
005	001	Masse - Räumgut - Baugrube mit Böschung - in Kilogramm	$=(((GB+2*(AUG*GH+0,5))*((GL+2*(AUG*GH+0,5))))*0,5)*1,3*1000$	kg	Annahme: Schichtdicke des Räumguts 50 cm; Umrechnungsfaktor: 1,3 Tonnen pro m <sup>3</sup> bzw. 0,77 m <sup>3</sup> pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung)
006	001	Volumen - abgetragener Oberboden - Baugrube mit Böschung	$=((GB+2*(AUG*GH+0,5))*((GL+2*(AUG*GH+0,5))))*0,1$	m <sup>3</sup>	Annahme: Schichtdicke des Oberbodens 10 cm
007	001	Massentransport - abgetragener Oberboden - Baugrube mit Böschung	$=(((GB+2*(AUG*GH+0,5))*((GL+2*(AUG*GH+0,5))))*0,1)*1,8*50$	t*km	Annahme: Schichtdicke des Oberbodens 10 cm; Umrechnungsfaktor: 1,8 Tonnen pro m <sup>3</sup> bzw. 0,56 m <sup>3</sup> pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung); Annahme: 50 km Transportweg zur Verwertungsstelle
008	001	Masse - abgetragener Oberboden - Baugrube mit Böschung - in Kilogramm	$=(((GB+2*(AUG*GH+0,5))*((GL+2*(AUG*GH+0,5))))*0,1)*1,8*1000$	kg	Annahme: Schichtdicke des Oberbodens 10 cm; Umrechnungsfaktor: 1,8 Tonnen pro m <sup>3</sup> bzw. 0,56 m <sup>3</sup> pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung);
009	001	Volumen - Baugrubenaushub - Baugrube mit Böschung	$=((AUG*GH-0,1)/6)*((2*(GH*AUG-0,1)+2*0,5+GB))*(2*(GH*AUG-0,1)+2*0,5+GL)+(2*0,5+GB)*(2*0,5+GL)+(4*(2*0,5*(GH*AUG-0,1)+2*0,5+GB))*(2*0,5*($	m <sup>3</sup>	Berechnung des Volumens als Prisma nach der Simpson'schen Regel: $V_s = h/6 (G_1 + G_2 + 4 \times G_M)$ Hinweis: Ab Unterkante Oberboden - 0,1 m unter Geländeoberkante (GOK)

			GH*AUG-0,1)+2*0,5+GL))		
010	001; 002	Fläche - Bodenplatte plus Arbeitsraum/-fläche (Breite bei Böschung: 0,5 m)	$=(GB+2*0,5)*(GL+2*0,5)$	m <sup>2</sup>	Annahme: Breite Arbeitsraum 0,5 m (gem. DIN 4124)
011	001; 002	Masse - nicht wiederverwendeter Bodenaushub - in Tonnen	$=((GB*GL)*(AUG*GH-0,1))*1,8$	t	Umrechnungsfaktor: 1,8 Tonnen pro m <sup>3</sup> bzw. 0,56 m <sup>3</sup> pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung); Hinweis: Überschüssiger Bodenaushub, welcher nicht für Arbeitsraumverfüllung genutzt werden kann, wird aufbereitet und anderweitig wiederverwendet
012	001; 002	Massentransport - nicht wiederverwendeter Bodenaushub	$=((GB*GL)*(AUG*GH-0,1))*1,8*50$	t*km	Umrechnungsfaktor: 1,8 Tonnen pro m <sup>3</sup> bzw. 0,56 m <sup>3</sup> pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung); Annahme: 50 km Transportweg zur Verwertungsstelle
013	001; 002	Masse - nicht wiederverwendeter Bodenaushub - in Kilogramm	$=((GB*GL)*(AUG*GH-0,1))*1,8*1000$	kg	Umrechnungsfaktor: 1,8 Tonnen pro m <sup>3</sup> bzw. 0,56 m <sup>3</sup> pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung); Hinweis: Überschüssiger Bodenaushub, welcher nicht für Arbeitsraumverfüllung genutzt werden kann, wird aufbereitet und anderweitig wiederverwendet
014	001	Volumen - zu verfüllender Arbeitsraum - Baugrube mit Böschung	=Formel009- $((GB*GL)*(AUG*GH))$	m <sup>3</sup>	
015	002	Fläche - Bodenplatte plus Arbeitsfläche - Baugrube mit Spundwand	$=(2*0,6+GB)*(2*0,6+GL)$	m <sup>2</sup>	Annahme: Breite Arbeitsraum 0,6 m (gem. DIN 4124)
016	002	Volumen - Räumgut - Baugrube mit Spundwand	$=(2*0,6+GB)*(2*0,6+GL)*0,5$	m <sup>3</sup>	Annahme: Schichtdicke des Räumguts 50 cm
017	002	Masse - Räumgut - Baugrube mit Spundwand - in Tonnen	$=(GB+2*0,6)*(GL+2*0,6)*0,5*1,3$	t	Annahme: Schichtdicke des Räumguts 50 cm; Umrechnungsfaktor: 1,3 Tonnen pro m <sup>3</sup> bzw. 0,77 m <sup>3</sup> pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung)
018	002	Massentransport - Räumgut - Baugrube mit Spundwand	$=(GB+2*0,6)*(GL+2*0,6)*0,5*1,3*50$	t*km	Annahme: Schichtdicke des Räumguts 50 cm; Umrechnungsfaktor: 1,3 Tonnen pro m <sup>3</sup> bzw. 0,77 m <sup>3</sup> pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung); Annahme: 50 km Transportweg zur Verwertungsstelle

019	002	Masse - Räumgut - Baugrube mit Spundwand - in Kilogramm	$= (GB + 2 \cdot 0,6) \cdot (GL + 2 \cdot 0,6) \cdot 0,5 \cdot 1,3 \cdot 1000$	kg	Annahme: Schichtdicke des Räumguts 50 cm; Umrechnungsfaktor: 1,3 Tonnen pro $m^3$ bzw. $0,77 m^3$ pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung)
020	002	Volumen - abgetragener Oberboden - Baugrube mit Spundwand	$= (2 \cdot 0,6 + GB) \cdot (2 \cdot 0,6 + GL) \cdot 0,1$	$m^3$	Annahme: Schichtdicke des Oberbodens 10 cm
021	002	Massentransport - abgetragener Oberboden - Baugrube mit Spundwand	$= (2 \cdot 0,6 + GB) \cdot (2 \cdot 0,6 + GL) \cdot 0,1 \cdot 1,8 \cdot 50$	t*km	Annahme: Schichtdicke des Oberbodens 10 cm; Umrechnungsfaktor: 1,8 Tonnen pro $m^3$ bzw. $0,56 m^3$ pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung); Annahme: 50 km Transportweg zur Verwertungsstelle
022	002	Masse - abgetragener Oberboden - Baugrube mit Spundwand - in Kilogramm	$= (2 \cdot 0,6 + GB) \cdot (2 \cdot 0,6 + GL) \cdot 0,1 \cdot 1,8 \cdot 1000$	kg	Annahme: Schichtdicke des Oberbodens 10 cm; Umrechnungsfaktor: 1,8 Tonnen pro $m^3$ bzw. $0,56 m^3$ pro Tonne (Quelle: Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung);
023	002	Volumen - Baugrubenaushub - Baugrube mit Spundwand	$= (2 \cdot 0,6 + GB) \cdot (2 \cdot 0,6 + GL) \cdot (GH \cdot AUG - 0,1)$	$m^3$	Hinweis: Ab Unterkante Oberboden - 0,1 m unter Geländeoberkante
024	002	Fläche - Baugrubenwand - Baugrube mit Spundwand	$= (2 \cdot (2 \cdot 0,6 + GB) + (2 \cdot (2 \cdot 0,6 + GL))) \cdot AUG \cdot GH$	$m^2$	Annahme: Breite Arbeitsraum 0,6 m (gem. DIN 4124)
025	002	Vorhaltezeit Spundwandfläche	$= (2 \cdot (2 \cdot 0,6 + GB) + (2 \cdot (2 \cdot 0,6 + GL))) \cdot AUG \cdot GH \cdot 6$	$m^2 \cdot M$ t	Annahme: 6 Monate Vorhaltung der Spundwände
026	002	Volumen - zu verfüllender Arbeitsraum - Baugrube mit Spundwand	$= ((2 \cdot 0,6 + GB) \cdot (2 \cdot 0,6 + GL) \cdot (GH \cdot AUG - 0,1)) - ((GB \cdot GL) \cdot (AUG \cdot GH))$	$m^3$	Annahme: Breite Arbeitsraum 0,6 m (gem. DIN 4124)
027	003; 005; 005a	Fläche - Gebäude	$= GB \cdot GL$	$m^2$	
028	003	Volumen - Sauberkeitsschicht	$= GB \cdot GL \cdot 0,05$	$m^3$	Annahme: Dicke Sauberkeitsschicht 5 cm
029	003	Masse - Perimeterdämmung unter Bodenplatte	$= GB \cdot GL \cdot 0,18 \cdot 115$	kg	Annahme: Dicke Perimeterdämmung 18 cm; Annahme: Rohdichte Schaumglas: $115,0 kg/m^3$ (gemäß Herstellerangabe Foamglas)
030	003	Fläche - Schalung Bodenplattenrand	$= (GHG/30) \cdot (GB \cdot 2 + GL \cdot 2)$	$m^2$	Annahme: Dicke/Höhe der Bodenplatte ( $h = \text{Gebäudehöhe}/30$ )
031	003	Massentransport - Schalung Bodenplattenrand	$= (GHG/30) \cdot (GB \cdot 2 + GL \cdot 2) \cdot 0,05 \cdot 25$	t*km	Geschätzte Annahme: Flächengewicht Schalungssystem $50 kg/m^2$ ; Annahme: 25 km Transportdistanz (eine Wegstrecke)
032	003	Masse - Perimeterdämmung Bodenplatte Stirnseiten	$= (GHG/30) \cdot (GB \cdot 2 + GL \cdot 2) \cdot 0,18 \cdot 115$	kg	Annahme: 18 cm Dicke Perimeterdämmung Annahme Rohdichte Schaumglas: $115,0 kg/m^3$ (gemäß Herstellerangabe Foamglas)
033	003	Masse - Betonstahlmatten - Bodenplatte - in Tonnen	$= ((GHG/30) \cdot GB \cdot GL) \cdot 0,08 \cdot 0,92$	t	Annahme: 92% von $80 kg/m^3$ Bewehrungsanteil
034	003	Masse - Betonstahlmatten - Bodenplatte - in Kilogramm	$= ((GHG/30) \cdot GB \cdot GL) \cdot 0,08 \cdot 0,92 \cdot 1000$	kg	Annahme: 92% von $80 kg/m^3$ Bewehrungsanteil
035	003	Masse - Betonstahl - Bodenplatte - in Tonnen	$= ((GHG/30) \cdot GB \cdot GL) \cdot 0,08 \cdot 0,08$	t	Annahme: 8% von $80 kg/m^3$ Bewehrungsanteil



036	003	Masse - Betonstabstahl - Bodenplatte - in Kilogramm	$=((GHG/30)*GB*GL)*0,08*0,08*1000$	kg	Annahme: 8% von 80 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
037	003, 006, 012, 006a	Umfang - Gebäude	$=GB*2+GL*2$	m	
038	003	Fläche - Fugenband zwischen Bodenplatte und Außenwände	$=(GB*2+GL*2)*0,2$	m <sup>2</sup>	Annahme: Breite Fugenband 20 cm Annahme: Fugenband einmal die Gebäudeseiten umlaufend
039	003	Volumen - Ortbeton - Bodenplatte	$=(GHG/30)*GB*GL$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke/Höhe der Bodenplatte (h=Gebäudehöhe/30)
040	004; 004a	Fläche - Geschossdecken	$=((GB*GL)-14,25)*(AG-1)$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Grundfläche des Treppenhauses (14,25 m <sup>2</sup> ) von Geschossfläche abgezogen
041	004	Massentransport - Schalung - Geschossdecken	$=((GB*GL)-14,25)*(AG-1)*0,05*25$	t*km	Geschätzte Annahme: Flächengewicht Schalungssystem 50 kg/m <sup>2</sup> ; Annahme: 25 km Transportdistanz (eine Wegstrecke)
042	004	Fläche - Deckenrand-schalung - Geschossdecken	$=(GB*2+GL*2)*0,25*(AG-1)$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Umfang Treppenhaus vernachlässigt
043	004	Massentransport - Deckenrand-schalung - Geschossdecken	$=(GB*2+GL*2)*0,25*(AG-1)*0,05*25$	t*km	Hinweis: Umfang Treppenhaus vernachlässigt; Geschätzte Annahme: Flächengewicht Schalungssystem 50 kg/m <sup>2</sup> ; Annahme: 25 km Transportdistanz (eine Wegstrecke)
044	004	Masse - Betonstahlmatten - Geschossdecken - in Tonnen	$=((GB*GL-14,25)*0,25)*0,1*0,2*(AG-1)$	t	Annahme: 20% von 100 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
045	004	Masse - Betonstahlmatten - Geschossdecken - in Kilogramm	$=((GB*GL-14,25)*0,25)*0,1*0,2*(AG-1)*1000$	kg	Annahme: 20% von 100 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
046	004	Masse - Betonstabstahl - Geschossdecken - in Tonnen	$=((GB*GL-14,25)*0,25)*0,1*0,8*(AG-1)$	t	Annahme: 80% von 100 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
047	004	Masse - Betonstabstahl - Geschossdecken - in Kilogramm	$=((GB*GL-14,25)*0,25)*0,1*0,8*(AG-1)*1000$	kg	Annahme: 80% von 100 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
048	004	Volumen - Ortbeton - Geschossdecken	$=(GB*GL-14,25)*(AG-1)*0,25$	m <sup>3</sup>	Hinweis: Grundfläche des Treppenhauses (14,25 m <sup>2</sup> ) von Geschossfläche abgezogen
049	005	Massentransport - Schalung - Dachgeschossdecke	$=GB*GL*0,05*25$	t*km	Geschätzte Annahme: Flächengewicht Schalungssystem 50 kg/m <sup>2</sup> ; Annahme: 25 km Transportdistanz (eine Wegstrecke)
050	005	Fläche - Deckenrand-schalung - Dachgeschossdecke	$=(GB*2+GL*2)*0,25$	m <sup>2</sup>	Annahme: Dicke Decken 25 cm
051	005	Massentransport - Deckenrand-schalung Dachgeschossdecke	$=(GB*2+GL*2)*0,25*0,05*25$	t*km	Geschätzte Annahme: Flächengewicht Schalungssystem 50 kg/m <sup>2</sup> ; Annahme: 25 km Transportdistanz (eine Wegstrecke)
052	005	Masse - Betonstahlmatte in Dachgeschossdecke - in Tonnen	$=((GB*GL*0,25)*0,1*0,2)$	t	Annahme: 20% von 100 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
053	005	Masse - Betonstahlmatte in Dachgeschossdecke - in Kilogramm	$=((GB*GL*0,25)*0,1*0,2)*1000$	kg	Annahme: 20% von 100 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
054	005	Masse - Betonstabstahl in Dachgeschossdecke - in Tonnen	$=(GB*GL*0,25)*0,1*0,8$	t	Annahme: 80% von 100 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil

055	005	Masse - Betonstabstahl in Dachgeschossdecke - in Kilogramm	$= (GB * GL * 0,25) * 0,1 * 0,8 * 1000$	kg	Annahme: 80% von 100 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
056	005	Volumen - Ortbeton - Dachgeschoss	$= GB * GL * 0,25$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Decke 25 cm
057	006; 006a	Fläche - Attika	$= ((2 * GB) + (2 * GL)) * 1$	m <sup>2</sup>	Annahme: Attikahöhe 1 meter (Dachaufbau 60 cm + 40 cm)
058	006	Massentransport - Schalung - Attika	$= ((2 * GB) + (2 * GL)) * 1 * 0,05 * 25$	t*km	Geschätzte Annahme: Flächengewicht Schalungssystem 50 kg/m <sup>2</sup> ; Annahme: 25 km Transportdistanz (eine Wegstrecke)
059	006	Masse - Betonstahlmatten - Attika - in Tonnen	$= (GB * GL - ((GB - 2 * 0,25) * (GL - 2 * 0,25))) * 1 * 0,07 * 0,6$	t	Annahme: 60% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
060	006	Masse - Betonstahlmatten - Attika - in Kilogramm	$= (GB * GL - ((GB - 2 * 0,25) * (GL - 2 * 0,25))) * 1 * 0,07 * 0,6 * 1000$	kg	Annahme: 60% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
061	006	Masse - Betonstabstahl - Attika - in Tonnen	$= (GB * GL - ((GB - 2 * 0,25) * (GL - 2 * 0,25))) * 1 * 0,07 * 0,4$	t	Annahme: 40% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
062	006	Masse - Betonstabstahl - Attika - in Kilogramm	$= (GB * GL - ((GB - 2 * 0,25) * (GL - 2 * 0,25))) * 1 * 0,07 * 0,4 * 1000$	kg	Annahme: 40% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
063	006	Volumen - Ortbeton - Attika	$= (GB * GL - ((GB - 2 * 0,25) * (GL - 2 * 0,25))) * 1$	m <sup>3</sup>	
064	006	Volumen - Dämmung - Attika	$= (GB * 2 + GL * 2) * 1 * 2 * 0,2$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Dämmung 20 cm
065	006; 006a	Fläche - Attikaabdeckung	$= ((2 * GB) + (2 * GL)) * 1,05$	m <sup>2</sup>	Annahme: Breite Attikaabdeckung 105 cm (dreifach gekantet)
066	006	Fläche - Dämmung - Attika	$= (GB * 2 + GL * 2) * 1 * 2$	m <sup>2</sup>	Annahme: Dicke Dämmung 20 cm
067	007	Fläche - Dämmung - Dachbelag	$= (GB - 2 * (0,25 + 0,2)) * (GL - 2 * (0,25 + 0,2)) - 1,5$	m <sup>2</sup>	Abzgl. Aussparung für Dachausstieg 1,5 m <sup>2</sup>
068	007	Masse - Gefälledämmung - Dachbelag	$= ((GB - 2 * (0,25 + 0,2)) * (GL - 2 * (0,25 + 0,2)) - 1,5) * 0,23 * 115$	kg	Annahme: Rohdichte Schaumglas: 115,0 kg/m <sup>3</sup> (gemäß Herstellerangabe Foamglas); Mittlere Schichtdicke: 0,23 m
069	007	Masse - Vegetationsschicht - Dachbelag	$= ((GB - 2 * (0,25 + 0,2)) * (GL - 2 * (0,25 + 0,2)) - 1,5) * 0,15 * 800$	kg	Annahme: Rohdichte Vegetationsschicht 800,0 kg/m <sup>3</sup> (Quelle: <a href="https://www.optigruen.de/produkte/substrate/extensiv-einschichtsubstrat-m-schwer/">https://www.optigruen.de/produkte/substrate/extensiv-einschichtsubstrat-m-schwer/</a> )
070	008, 011	Fläche - Außenwand unterirdische Geschosse	$= ((2 * GB) + (2 * GL)) * (AUG * GH)$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Keine Öffnungen vorhanden und deshalb auch keine berücksichtigt
071	008	Massentransport - Schalung - Außenwand unterirdische Geschosse	$= ((2 * GB) + (2 * GL)) * (AUG * GH) * 0,05 * 25$	t*km	Geschätzte Annahme: Flächengewicht Schalungssystem 50 kg/m <sup>2</sup> ; Annahme: 25 km Transportdistanz (eine Wegstrecke)
072	008	Masse - Betonstahlmatten - Außenwand unterirdische Geschosse - in Tonnen	$= AUG * GH * ((2 * GB) + (2 * GL)) * 0,3 * 0,07 * 0,6$	t	Annahme: Außenwanddicke unterirdische Geschosse 30 cm; Annahme: 60% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
073	008	Masse - Betonstahlmatten - Außenwand unterirdische Geschosse - in Kilogramm	$= AUG * GH * ((2 * GB) + (2 * GL)) * 0,3 * 0,07 * 0,6 * 1000$	kg	Annahme: 60% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
074	008	Masse - Betonstabstahl - Außenwand unterirdische Geschosse - in Tonnen	$= AUG * GH * ((2 * GB) + (2 * GL)) * 0,3 * 0,07 * 0,4$	t	Annahme: 40% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil

075	008	Masse - Betonstahl - Außenwand unterirdische Geschosse - in Kilogramm	=AUG*GH*((2*GB)+(2*GL))*0,3*0,07*0,4*1000	kg	Annahme: 40% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
076	008	Volumen - Ortbeton - Außenwand unterirdische Geschosse	=AUG*GH*((2*GB)+(2*GL))*0,3	m <sup>3</sup>	Annahme: Außenwanddicke unterirdische Geschosse 30 cm
077	008	Länge - Fugenband - Außenwand unterirdische Geschosse	=4*GH*AUG	m	Annahme: In jede Ecke (4 Ecken) über die Geschosshöhe der unterirdischen Geschosse ein Fugenband
078	008	Fläche - Fugenband - Außenwand unterirdische Geschosse	=4*GH*AUG*0,3	m <sup>2</sup>	Annahmen: Breite Fugenband 30 cm
079	009, 012	Fläche - Fassade - oberirdische Geschosse (hier inkl. Attika)	=(2*GB)+(2*GL))*GHO	m <sup>2</sup>	Hinweis: Hier keine Wandöffnungen berücksichtigt/Fensteröffnungen übermessen
080	009	Massentransport - Schalung - Außenwand oberirdische Geschosse	=(2*GB)+(2*GL))*(AOG*GH)*0,05*25	t*km	Geschätzte Annahme: Flächengewicht Schalungssystem 50 kg/m <sup>2</sup> ; Annahme: 25 km Transportdistanz (eine Wegstrecke)
081	009	Masse - Betonstahlmatten - Außenwand oberirdische Geschosse - in Tonnen	=(AOG*GH*((2*GB)+(2*GL))-(SF*1,2))*0,25*0,07*0,6	t	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster abgezogen; Annahme: Außenwanddicke oberirdische Geschosse 25 cm; Annahme: 60% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
082	009	Masse - Betonstahlmatten - Außenwand oberirdische Geschosse - in Kilogramm	=(AOG*GH*((2*GB)+(2*GL))-(SF*1,2))*0,25*0,07*0,6*1000	kg	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster abgezogen; Annahme: 60% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
083	009	Masse - Betonstahl - Außenwand oberirdische Geschosse - in Tonnen	=(AOG*GH*((2*GB)+(2*GL))-(SF*1,2))*0,25*0,07*0,4	t	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster abgezogen; Annahme: 40% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
084	009	Masse - Betonstahl - Außenwand oberirdische Geschosse - in Kilogramm	=(AOG*GH*((2*GB)+(2*GL))-(SF*1,2))*0,25*0,07*0,4*1000	kg	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster abgezogen; Annahme: 40% von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
085	009	Volumen - Ortbeton - Außenwand oberirdische Geschosse	=(AOG*GH*((2*GB)+(2*GL))-(SF*1,2))*0,25	m <sup>3</sup>	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster abgezogen; Annahme: Außenwanddicke oberirdische Geschosse 25 cm
086	009, 012	Fläche - Fassade - Außenwand oberirdische Geschosse - abzgl. Fensteröffnungen	=(AOG*GH*((2*GB)+(2*GL))-(SF*1,2))	m <sup>2</sup>	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster abgezogen
197	009	Volumen - Hauseingangstür	=1,21*2,135*0,1	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Türelement 10 cm; Annahme: Höhe Hauseingangstür 2,135 m; Breite Hauseingangstür 1,21 m
128	009	Anzahl - Einfachfenster	=RUN-DEN(GB*GL*AOG*0,20/1,2;0)	St	Getroffene Annahme: 20% der oberirdischen Bruttogeschossfläche (Mindestvorgabe gemäß MBO: 10%) Annahme: Fläche Einfachfenster 1,2 m <sup>2</sup> (1m Breite, 1,2 Länge)
129	009	Fläche - Einfachfenster gesamt	=SF*(1,2*1)	m <sup>2</sup>	Annahme: Fläche Einfachfenster 1,2 m <sup>2</sup> (1m Breite, 1,2 Länge)
087	010	Fläche - Schalung - Tragende Innenstützen	=(0,275*2+2*0,275)*LR*SI*AG	m <sup>2</sup>	Annahme: Dicke Stütze = 1,1*Außenwand oberirdische Geschosse (Breite 0,275 m; Länge 0,275 m)

088	010	Massentransport - Schalung - Tragende Innenstützen	$=0,275*0,275*LR*SIS*AG*0,05*25$	t*km	Annahme: Dicke Stütze = 1,1*Außenwand oberirdische Geschosse (Breite 0,275 m; Länge 0,275 m); Geschätzte Annahme: Flächengewicht Schalungssystem 50 kg/m <sup>2</sup> ; Annahme: 25 km Transportdistanz (eine Wegstrecke)
089	010	Masse - Betonstabstahl - Tragende Innenstützen - in Tonnen	$=0,275*0,275*LR*SIS*AG*0,15$	t	Annahme: 150 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
090	010	Masse - Betonstabstahl - Tragende Innenstützen - in Kilogramm	$=(0,275*0,275*LR*SIS*AG)*0,15*1000$	kg	Annahme: 150 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
091	010	Länge - Tragende Innenstützen	$=LR*SIS*AG$	m	
092	010	Volumen - Tragende Innenstützen	$=0,275*0,275*LR*SIS*AG$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Stütze = 1,1*Außenwand oberirdische Geschosse (Breite 0,275 m; Länge 0,275 m)
093	010	Anzahl - Durchstanzbewehrungen - Tragende Innenstützen	$=SIS*AG$	St	Annahme: Pro Stütze eine Durchstanzbewehrung
094	010	Masse - Durchstanzbewehrungen - Tragende Innenstützen - in Kilogramm	$=SIS*AG*20$	kg	Geschätzte Annahme: Durchstanzbewehrung je 20 kg
224	011	Fläche - Außenwandbekleidung, innen - unterirdische Geschosse	$=(2*GB+2*GL)*LR*AUG$	m <sup>2</sup>	
225	011	Volumen - Innenputz - Außenwandbekleidungen, innen - unterirdische Geschosse	$=(2*GB+2*GL)*LR*AUG*0,01$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Innenputz 1 cm
226	011	Masse - Farbanstrich - Außenwandbekleidungen, innen - unterirdische Geschosse	$=(2*GB+2*GL)*LR*AUG*0,203$	kg	Annahme: Flächengewicht Farbe 0,142 liter/m <sup>2</sup> = 0,203 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe">https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe</a> )
095	011	Masse - Bitumenkleber Perimeterdämmung - Außenwandbekleidungen, außen - unterirdische Geschosse	$=(2*GB+2*GL)*LR*AUG*0,5$	kg	Annahme: Flächengewicht Bitumenkleber 500 g/m <sup>2</sup>
221	012	Fläche - Außenwandbekleidungen, innen - abzgl. Fensterflächen - oberirdische Geschosse	$=(2*GB+2*GL)*LR*AOG-(SF*1,2)$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster berücksichtigt
222	012	Volumen - Innenputz - Außenwandbekleidungen, innen - oberirdische Geschosse	$=(2*GB+2*GL)*LR*AOG-(SF*1,2)*0,01$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Innenputz 1 cm
223	012	Masse - Farbanstrich - Außenwandbekleidungen, innen - oberirdische Geschosse	$=(2*GB+2*GL)*LR*AOG-(SF*1,2)*0,203$	kg	Annahme: Flächengewicht Farbe 0,142 liter/m <sup>2</sup> = 0,203 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe">https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe</a> )
096	012	Volumen - Dämmung WDVS - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=(AOG*GH*(2*GB)+(2*GL))-(SF*1,2))*0,2$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Dämmung 20 cm

097	012	Masse - Schraubdübel WDVS - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=(\text{AOG} \cdot \text{GH} \cdot ((2 \cdot \text{GB}) + (2 \cdot \text{G L})) - (\text{SF} \cdot 1,2)) \cdot 8 \cdot 0,158$	kg	Annahme: Als äquivalent für WDVS-Schraubdübel wird eine M12 Schraube angenommen. M12 Schraube 200 mm Länge entspricht 0,158 kg (gemäß DIN 933) Annahme: Acht Dübel pro Quadratmeter
098	012	Volumen - Armierungsputz WDVS - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=(\text{AOG} \cdot \text{GH} \cdot ((2 \cdot \text{GB}) + (2 \cdot \text{G L})) - (\text{SF} \cdot 1,2)) \cdot 0,004$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Armierungsputz 4 mm
099	012	Masse - Putzgrundierung/Putzhaftvermittler WDVS - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=(\text{AOG} \cdot \text{GH} \cdot ((2 \cdot \text{GB}) + (2 \cdot \text{G L})) - (\text{SF} \cdot 1,2)) \cdot 0,37$	kg	Annahme: Flächengewicht Putzgrundierung 0,250 liter/m <sup>2</sup> = 0,37 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data">https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data</a> )
100	012	Volumen - Oberputz WDVS - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=(\text{AOG} \cdot \text{GH} \cdot ((2 \cdot \text{GB}) + (2 \cdot \text{G L})) - (\text{SF} \cdot 1,2)) \cdot 0,003$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Oberputz 3 mm
101	012	Masse - Fassadenanstrich - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=(\text{AOG} \cdot \text{GH} \cdot ((2 \cdot \text{GB}) + (2 \cdot \text{G L})) - (\text{SF} \cdot 1,2)) \cdot 0,203$	kg	Annahme: Flächengewicht Farbe 0,142 liter/m <sup>2</sup> = 0,203 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe">https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe</a> )
102	012, 0101, 012a	Länge - Fensterleibungen (ohne Fensterbänke) gesamt - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=\text{SF} \cdot (1 + 2 \cdot 1,2)$	m	Hinweis: Entspricht dem Umfang der Fenster abzgl. untere Seite (Fensterbank)
103	012, 012a	Anzahl - Diagonalbewehrungen WDVS (4 pro Fensteröffnung) - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=\text{SF} \cdot 4$	St	
104	012, 012a	Volumen - Dämmung WDVS - Fensterleibungen - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=\text{SF} \cdot (1 + 2 \cdot 1,2) \cdot 0,25 \cdot 0,2$	m <sup>3</sup>	Annahme: Breite Fensterleibungen 0,25 m; Annahme: Dicke Dämmung 0,2 m
105	012, 012a	Fläche - Armierungsgebeude WDVS - Fensterleibungen - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=\text{SF} \cdot (1 + 2 \cdot 1,2) \cdot 0,25$	m <sup>2</sup>	Annahme: Breite Fensterleibungen 0,25 m
106	012, 012a	Volumen - Armierungsputz WDVS - Fensterleibungen - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=\text{SF} \cdot (1 + 2 \cdot 1,2) \cdot 0,25 \cdot 0,004$	m <sup>3</sup>	Annahme: Mittlere Dicke des Armierungsputzes 4 mm
107	012, 012a	Masse - Putzgrundierung/Putzhaftvermittler WDVS - Fensterleibungen - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=\text{SF} \cdot (1 + 2 \cdot 1,2) \cdot 0,25 \cdot 0,37$	kg	Annahme: Flächengewicht Putzgrundierung 0,250 liter/m <sup>2</sup> = 0,37 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data">https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data</a> )
108	012, 012a	Volumen - Oberputz WDVS - Fensterleibungen - Außenwandbekleidungen, außen -	$=\text{SF} \cdot (1 + 2 \cdot 1,2) \cdot 0,25 \cdot 0,003$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Oberputz 3 mm

		oberirdische Geschosse			
109	012, 012a	Masse - Fassadenanstrich - Fensterleibungen - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=SF*(1+2*1,2)*0,25*0,203$	kg	Annahme: Flächengewicht Farbe 0,142 liter/m <sup>2</sup> = 0,203 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe">https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe</a> )
110	012, 012a	Länge - Fensterbänke/Abdichtung unter Fensterbänke - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=SF*1$	m	Annahme: Länge Fensterbank 1 m
111	012, 012a	Fläche - Fensterbänke/Abdichtung unter Fensterbänke - Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$=SF*1*0,285$	m <sup>2</sup>	Annahme: Länge Fensterbank 1 m; Breite Fensterbank 0,285 m
112	101; 101a	Fläche - Mauerwerk Innenwände - Ausbau Aufenthaltsräume	$=((((((FAR^{0,5})^4*WEE*AWE)+(((10^{0,5})^4*WEE)-(GB*2+GL*2))/2)*LR*AO G))-(AOG*WEE*(AWE+1)*0,885*2,01)$	m <sup>2</sup>	Annahmen: Im UG keine Innenwände aus Mauerwerk (nur tragende Innenstützen); Hinweis: Wandöffnungen von Türen sind berücksichtigt
113	101	Volumen - Mauerwerk Innenwände - Ausbau Aufenthaltsräume	$=((((((FAR^{0,5})^4*WEE*AWE)+(((10^{0,5})^4*WEE)-(GB*2+GL*2))/2)*LR*AO G))-(AOG*WEE*(AWE+1)*0,885*2,01)*0,24$	m <sup>3</sup>	Annahmen: Im UG keine Innenwände aus Mauerwerk (nur tragende Innenstützen); Hinweis: Wandöffnungen von Türen sind berücksichtigt; Annahme: Wanddicke 0,24 m
118	'101, 101a	Fläche - Innenwandputz - Ausbau Aufenthaltsräume	$=((((((FAR^{0,5})^4*WEE*AWE)+(((10^{0,5})^4*WEE)-(GB*2+GL*2))/2)*LR*AO G))-(AOG*WEE*(AWE+1)*0,885*2,01)*2$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Innenputz beidseitig auf Innenwand
119	'101	Volumen - Innenwandputz - Ausbau Aufenthaltsräume	$=((((((FAR^{0,5})^4*WEE*AWE)+(((10^{0,5})^4*WEE)-(GB*2+GL*2))/2)*LR*AO G))-(AOG*WEE*(AWE+1)*0,885*2,01)*2*0,01$	m <sup>3</sup>	Hinweis: Innenputz beidseitig auf Innenwand; Annahme: Dicke Innenputz 1 cm
120	'101, 101a	Masse - Innenwandfarbe - Ausbau Aufenthaltsräume	$=((((((FAR^{0,5})^4*WEE*AWE)+(((10^{0,5})^4*WEE)-(GB*2+GL*2))/2)*LR*AO G))-(AOG*WEE*(AWE+1)*0,885*2,01)*2*0,203$	kg	Hinweis: Farbanstrich beidseitig auf Innenwand; Annahme: Flächengewicht Putzgrundierung 0,250 liter/m <sup>2</sup> = 0,37 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data">https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data</a> )
121	'101, 101a	Anzahl - Aufenthaltsräume inkl. Küchen	$=AOG*WEE*(AWE+1)$	St	Hinweis: Je Wohneinheit eine Küche mit 10 m <sup>2</sup>
122	'101, 101a	Volumen - Türblatt Innentüren - Ausbau Aufenthaltsräume	$=AOG*WEE*(AWE+1)*2,01*0,885*0,04$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke des Innentürblatts 40 mm; Breite Innentürblatt 0,885 m; Länge Innentürblatt 2,01 m
123	101, 101a	Fläche - Aufenthaltsräume inkl. Küchen plus Fläche unterirdische Geschosse	$=FAR*AWE*WEE*AOG+(10*WEE*AOG)+((GB*GL-14,25)*AUG)$	m <sup>2</sup>	Hinweis: In den unterirdischen Geschossen wird nur Bodenbelag berücksichtigt
124	'101, 101a	Umfang - Randdämmstreifen Estrich - Ausbau Aufenthaltsräume	$=((FAR*AWE*WEE*AOG)+(10*WEE*AOG)+((GB*GL-14,25)*AUG))^{0,5*4}$	m	

125	'101, 101a	Masse - Randdämmstreifen Estrich - Ausbau Aufenthaltsräume	$=(((\text{FAR} \cdot \text{AWE} \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) + (10 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})) \cdot (\text{GB} \cdot \text{GL} - 14,25) \cdot \text{AUG})^{\wedge} 0,5 \cdot 4) \cdot 0,01 \cdot 0,1 \cdot 30$	kg	Annahme: Rohdichte Randdämmstreifen 30 kg/m <sup>3</sup> ; Dicke Randdämmstreifen 1 cm; Höhe Randdämmstreifen 10 cm
126	'101, 101a	Volumen - Trittschalldämmung - Ausbau Aufenthaltsräume	$=((\text{FAR} \cdot \text{AWE} \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) + (10 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})) \cdot (\text{GB} \cdot \text{GL} - 14,25) \cdot \text{AUG}) \cdot 0,03$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Trittschalldämmung 3 cm
127	'101, 101a	Masse - Zementestrich - Ausbau Aufenthaltsräume	$=((\text{FAR} \cdot \text{AWE} \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) + (10 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})) \cdot (\text{GB} \cdot \text{GL} - 14,25) \cdot \text{AUG}) \cdot 0,05 \cdot 2000$	kg	Annahme: Dicke Zementestrich 5 cm; Annahme: Rohdichte Zementestrich 2000 kg/m <sup>3</sup> (Quelle: <a href="https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/basiswissen/zementmerkmale/B19.pdf">https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/basiswissen/zementmerkmale/B19.pdf</a> )
130	'101, 101a	Masse - Haftbrücke Deckenputz - Ausbau Aufenthaltsräume	$=((\text{FAR} \cdot \text{AWE} \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) + (10 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})) \cdot (\text{GB} \cdot \text{GL} - 14,25) \cdot \text{AUG}) \cdot 0,37$	kg	Annahme: Flächengewicht Putzgrundierung 0,250 liter/m <sup>2</sup> = 0,37 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data">https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data</a> )
131	'101, 101a	Volumen - Deckenputz - Ausbau Aufenthaltsräume	$=((\text{FAR} \cdot \text{AWE} \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) + (10 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})) \cdot (\text{GB} \cdot \text{GL} - 14,25) \cdot \text{AUG}) \cdot 0,01$	m <sup>3</sup>	
132	'101, 101a	Masse - Farbanstrich Decke - Ausbau Aufenthaltsräume	$=((\text{FAR} \cdot \text{AWE} \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) + (10 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})) \cdot (\text{GB} \cdot \text{GL} - 14,25) \cdot \text{AUG}) \cdot 0,203$	kg	Annahme: Flächengewicht Farbe 0,142 liter/m <sup>2</sup> = 0,203 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe">https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe</a> )
133	102	Fläche - Mauerwerk Innenwände - Ausbau Nassräume	$=(((6^{\wedge} 0,5 \cdot 4) \cdot \text{LR}) \cdot \text{AOG} \cdot \text{WEE}) / 2) - (0,885 \cdot 2,01 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})$	m <sup>2</sup>	Annahme: Je Wohneinheit ein Nassraum mit 6 m <sup>2</sup> ; Hinweis: Wandöffnungen für Türen berücksichtigt; Breite Nassraumtür 0,885 m; Länge Nassraumtür 2,01 m
134	102	Volumen - Mauerwerk Innenwände - Ausbau Nassräume	$=(((6^{\wedge} 0,5 \cdot 4) \cdot \text{LR}) \cdot \text{AOG} \cdot \text{WEE}) / 2) - (0,885 \cdot 2,01 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) \cdot 0,24$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Mauerwerk Innenwände 24 cm
139	102	Fläche - Innenwandbekleidung - Ausbau Nassräume	$=(((6^{\wedge} 0,5 \cdot 4) \cdot \text{LR}) \cdot \text{AOG} \cdot \text{WEE}) - (0,885 \cdot 2,01 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})$	m <sup>2</sup>	Annahme: Je Wohneinheit ein Nassraum mit 6 m <sup>2</sup> ; Hinweis: Wandöffnungen für Türen berücksichtigt
140	102	Masse - Abdichtungsschicht - Ausbau Nassräume	$=(((6^{\wedge} 0,5 \cdot 4) \cdot \text{LR}) \cdot \text{AOG} \cdot \text{WEE}) - (0,885 \cdot 2,01 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) \cdot 0,37 \cdot 2$	kg	Annahme: Flächengewicht Putzgrundierung 0,250 liter/m <sup>2</sup> = 0,37 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data">https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data</a> ); Hinweis: Abdichtungsschicht zweilagig
141	102	Masse - Dünnbettmörtel - Ausbau Nassräume	$=(((6^{\wedge} 0,5 \cdot 4) \cdot \text{LR}) \cdot \text{AOG} \cdot \text{WEE}) - (0,885 \cdot 2,01 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) \cdot 1,5$	kg	Annahme: Flächengewicht 1,5 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.schlueder.de/ditra_25.aspx">https://www.schlueder.de/ditra_25.aspx</a> )
142	102, 103	Anzahl - Nassräume/Wohnungseingangsbereiche	$=\text{AOG} \cdot \text{WEE}$	St	
143	102	Volumen - Türblatt - Ausbau Nassräume	$=(\text{AOG} \cdot \text{WEE}) \cdot (2,01 \cdot 0,885 \cdot 0,04)$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Türblatt 40 mm; Breite Nassraumtür 0,885 m; Länge Nassraumtür 2,01 m
144	102	Fläche - Nassräume	$=\text{AOG} \cdot \text{WEE} \cdot 6$	m <sup>2</sup>	Annahme: Je Wohneinheit ein Nassraum mit 6 m <sup>2</sup>
145	102	Umfang - Randdämmstreifen Estrich - Ausbau Nassräume	$=(\text{AOG} \cdot \text{WEE} \cdot 6)^{\wedge} 0,5 \cdot 4$	m	Annahme: Je Wohneinheit ein Nassraum mit 6 m <sup>2</sup>

146	102	Masse - Randdämmstreifen Estrich - Ausbau Nassräume	$=((AOG*WEE*6)^{0,5*4})^{*0,1*0,01*30}$	kg	Annahme: Rohdichte Randdämmstreifen 30 kg/m <sup>3</sup> ; Dicke Randdämmstreifen 1 cm; Höhe Randdämmstreifen 10 cm
147	102	Volumen - Trittschalldämmung - Ausbau Nassräume	$=AOG*WEE*6*0,03$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Trittschalldämmung 3 cm
148	102	Masse - Zementestrich - Ausbau Nassräume	$=AOG*WEE*6*0,05*2000$	kg	Annahme: Dicke Zementestrich 5 cm; Annahme: Rohdichte Zementestrich 2000 kg/m <sup>3</sup> (Quelle: <a href="https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/basiswissen/zementmerkblaetter/B19.pdf">https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/basiswissen/zementmerkblaetter/B19.pdf</a> )
149	102	Fläche - Abdichtungsschicht - Ausbau Nassräume	$=AOG*WEE*6*2$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Abdichtungsschicht zweilagig
150	102	Masse - Abdichtungsschicht Boden - Ausbau Nassräume	$=AOG*WEE*6*2*0,37$	kg	Annahme: 0,250 liter/m <sup>2</sup> = 0,37 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data">https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data</a> )
151	102	Masse - Dünnbettmörtel Boden - Ausbau Nassräume	$=AOG*WEE*6*1,5$	kg	Annahme: Flächengewicht Dünnbettmörtel 1,5 kg/m <sup>2</sup>
152	102	Länge - elastische Fugenabdichtung - Ausbau Nassräume	$=((AOG*WEE*6)^{0,5*4})+(AOG*WEE*4*LR)$	m	Annahme: Fugen in allen Wandecken (4-mal die Raumhöhe und einmal den Bodenumfang)
153	102	Masse - elastische Fugenabdichtung - Ausbau Nassräume	$=(((AOG*WEE*6)^{0,5*4})+(AOG*WEE*4*LR))*0,01*0,01*1033$	kg	Annahme: Dichte Fugenabdichtung 1033 kg/m <sup>3</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/silikon/silikon/p/13880117">https://www.bauhaus.info/silikon/silikon/p/13880117</a> ); Annahme: Breite 1 cm; Höhe 1 cm
156	102	Masse - Haftbrücke Deckenputz - Ausbau Nassräume	$=AOG*WEE*6*0,37$	kg	Annahme: 0,250 liter/m <sup>2</sup> = 0,37 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data">https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data</a> )
157	102	Volumen - Deckenputz - Ausbau Nassräume	$=AOG*WEE*6*0,01$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Innenputz 1 cm
158	102	Masse - Farbanstrich Decke - Ausbau Nassräume	$=AOG*WEE*6*0,203$	kg	Annahme: Flächengewicht Farbe 0,142 liter/m <sup>2</sup> = 0,203 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe">https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe</a> )
159	103	Fläche - Mauerwerk Innenwände - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=(((AWE*2,5)^{0,5*4*LR*AOG*WEE})/2)$	m <sup>2</sup>	Annahme: Je Wohneinheit ein Wohnungseingangsbereich (Flur) mit einer Fläche abhängig der Anzahl der Aufenthaltsräume (je Aufenthaltsraum 2,5 m <sup>2</sup> )
160	103	Volumen - Mauerwerk Innenwände - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=(((AWE*2,5)^{0,5*4*LR*AOG*WEE})/2)*0,24$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Mauerwerk Innenwände 24 cm
165	103	Fläche - Innenwandputz - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=(((AWE*2,5)^{0,5*4*LR*AOG*WEE})/2)*2$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Innenputz beidseitig auf Innenwand
166	103	Volumen - Innenwandputz - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=(((AWE*2,5)^{0,5*4*LR*AOG*WEE})/2)*2*0,01$	m <sup>3</sup>	Hinweis: Innenputz beidseitig auf Innenwand; Annahme: Dicke Innenputz 1 cm
167	103	Masse - Innenwandfarbe - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=(((AWE*2,5)^{0,5*4*LR*AOG*WEE})/2)*2*0,203$	kg	Hinweis: Farbanstrich beidseitig auf Innenwand; Annahme: Flächengewicht Farbe 0,142 liter/m <sup>2</sup> = 0,203 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe">https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe</a> )



170	103	Fläche - Wohnungseingangsbereiche	$=(\text{AWE} \cdot 2,5) \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}$	m <sup>2</sup>	Annahme: Je Wohneinheit ein Wohnungseingangsbereich (Flur) mit einer Fläche abhängig der Anzahl der Aufenthaltsräume (je Aufenthaltsraum 2,5 m <sup>2</sup> )
171	103	Umfang - Randdämmstreifen Estrich - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=((\text{AWE} \cdot 2,5) \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) \cdot 0,5 \cdot 4$	m	Annahme: Je Wohneinheit ein Wohnungseingangsbereich (Flur) mit einer Fläche abhängig der Anzahl der Aufenthaltsräume (je Aufenthaltsraum 2,5 m <sup>2</sup> )
172	103	Masse - Randdämmstreifen Estrich - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=(((\text{AWE} \cdot 2,5) \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) \cdot 0,5 \cdot 4) \cdot 0,1 \cdot 0,01 \cdot 30$	kg	Annahme: Rohdichte Randdämmstreifen 30 kg/m <sup>3</sup> ; Dicke Randdämmstreifen 1 cm; Höhe Randdämmstreifen 10 cm
173	103	Volumen - Trittschalldämmung - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=((\text{AWE} \cdot 2,5) \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) \cdot 0,03$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Trittschalldämmung 3 cm
174	103	Masse - Zementestrich - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=((\text{AWE} \cdot 2,5) \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) \cdot 0,05 \cdot 2000$	kg	Annahme: Dicke Zementestrich 5 cm; Annahme: Rohdichte Zementestrich 2000 kg/m <sup>3</sup> (Quelle: <a href="https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/basiswissen/zementmerkblaetter/B19.pdf">https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/basiswissen/zementmerkblaetter/B19.pdf</a> )
175	103	Masse - Haftbrücke Deckenputz - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=((\text{AWE} \cdot 2,5) \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) \cdot 0,37$	kg	Annahme: Flächengewicht Grundierung 0,250 liter/m <sup>2</sup> = 0,37 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data">https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data</a> )
176	103	Volumen - Deckenputz - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=((\text{AWE} \cdot 2,5) \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) \cdot 0,01$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Innenputz 1 cm
177	103	Masse - Farbanstrich Decke - Ausbau Wohnungseingangsbereiche	$=((\text{AWE} \cdot 2,5) \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG}) \cdot 0,203$	kg	Annahme: Flächengewicht Farbe 0,142 liter/m <sup>2</sup> = 0,203 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe">https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe</a> )
178	104	Fläche - Schalung - Treppenhaus	$=((2,5 + 2 \cdot 5,7) \cdot (\text{AG} \cdot \text{GH}))$	m <sup>2</sup>	Annahme: Grundfläche Treppenhaus 14,25 m <sup>2</sup> (Länge: 5,7 m; Breite: 2,5 m) Hinweis: Wandöffnungen der Wohnungseingangstüren übermessen Hinweis: Nur innenliegende Wände, da Außenwand bei Modul 009 enthalten
179	104	Massentransport - Schalung - Treppenhaus	$=(((2,5 + 2 \cdot 5,7) \cdot \text{AG} \cdot \text{GH}) - (0,885 \cdot 2,01 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})) \cdot 0,05 \cdot 25$	t*km	Hinweis: Wandöffnungen für Türen berücksichtigt; Geschätzte Annahme: Flächengewicht Schalungssystem 50 kg/m <sup>2</sup> ; Annahme: 25 km Transportdistanz (eine Wegstrecke)
180	104	Masse - Betonstahlmatten - Treppenhaus - in Tonnen	$=(((2,5 + 2 \cdot 5,7) \cdot \text{AG} \cdot \text{GH}) - (0,885 \cdot 2,01 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})) \cdot 0,25 \cdot 0,07 \cdot 0,6$	t	Annahme: Wanddicke Treppenhaus 25 cm; Annahme: 60 % von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
181	104	Masse - Betonstahlmatten - Treppenhaus - in Kilogramm	$=(((2,5 + 2 \cdot 5,7) \cdot \text{AG} \cdot \text{GH}) - (0,885 \cdot 2,01 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})) \cdot 0,25 \cdot 0,07 \cdot 0,6 \cdot 1000$	kg	Annahme: 60 % von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
182	104	Masse - Betonstabstahl - Treppenhaus - in Tonnen	$=(((2,5 + 2 \cdot 5,7) \cdot \text{AG} \cdot \text{GH}) - (0,885 \cdot 2,01 \cdot \text{WEE} \cdot \text{AOG})) \cdot 0,25 \cdot 0,07 \cdot 0,4$	t	Annahme: 40 % von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil

183	104	Masse - Betonstabstahl - Treppenhaus - in Kilogramm	$=(((2,5+2*5,7)*AG*GH)-(0,885*2,01*WEE*AOG))*0,25*0,07*0,4*1000$	kg	Annahme: 40 % von 70 kg/m <sup>3</sup> Bewehrungsanteil
184	104	Volumen - Ortbeton - Treppenhaus	$=(((2,5+2*5,7)*AG*GH)-(0,885*2,01*WEE*AOG))*0,25$	m <sup>3</sup>	Annahme: Wanddicke Treppenhaus 25 cm;
168	104	Volumen - Türblatt Wohnungseingangstüren - Treppenhaus	$=AOG*WEE*(2,01*0,885*0,06)$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Türblatt 60 mm; Breite Wohnungseingangstür 0,885 m; Länge Wohnungseingangstür 2,01 m
169	104	Volumen - Umfassungszarge Wohnungseingangstüren - Treppenhaus	$=AOG*WEE*(2*2,01*0,24*0,04+0,885*0,24*0,04)$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Umfassungszarge 40 mm
185	104	Anzahl - Trittschalldämmelement Podeste - Treppenhaus	$= (AG-1)*2*4$	St	Annahme: 4 Trittschallelemente je Podest
186	104	Masse - Trittschalldämmelement Bodenplatte - Treppenhaus	$=1*(1,2*0,1675*0,27)*125$	kg	Annahme: Dichte Trittschallelement 125 kg/m <sup>3</sup>
187	104	Länge - Trittschalldämmelement Auflager Treppenlauf auf Podest - Treppenhaus	$=1,2+((AG-1)*2)$	m	
188	104	Masse - Trittschalldämmelement Auflager Treppenlauf auf Podest - Treppenhaus	$=((AG-1)*2)*(1,2*0,1675*0,27)*125$	kg	Annahme: Dichte Trittschallelement 125 kg/m <sup>3</sup>
189	104	Länge - Treppelauf und Podeste - Treppenhaus	$=((AG-1)*2)*(((0,1675^2+0,2714^2)^{0,5}*(6+12))+2*(1,2*2+2,5))$	m	Hinweis: Zwei Treppenlauftypen (1: 12 Steigungen; 2: 6 Steigungen)
190	104	Masse - Trittschalldämmelement Treppenlauf und Podest zu Wand - Treppenhaus	$=((AG-1)*2)*(((0,1675^2+0,2714^2)^{0,5}*(6+12))+2*(1,2*2+2,5))*0,27*0,01*125$	kg	Annahme: Dichte Trittschallelement 125 kg/m <sup>3</sup>
191	104	Anzahl - Treppenläufe je Typ - Treppenhaus	$= (AG-1)$	St	Hinweis: Zwei Treppenlauftypen (1: 12 Steigungen; 2: 6 Steigungen)
192	104	Anzahl - Treppenpodeste - Treppenhaus	$= (AG-1)*2$	St	
193	104	Fläche - Treppenpodeste - Treppenhaus	$=((AG-1)*2)*1,2*2,5$	m <sup>2</sup>	
194	104	Länge - Treppengeländer - Treppenhaus	$=((AG-1)*2)*(((0,1675^2+0,2714^2)^{0,5}*(6+12))+2*0,1)$	m	Hinweis: Zwei Treppenlauftypen (1: 12 Steigungen; 2: 6 Steigungen)
227	104	Masse - Treppengeländer - Treppenhaus	$=(((AG-1)*2)*(((0,1675^2+0,2714^2)^{0,5}*(6+12))+2*0,1))*50$	kg	Annahme: 50 kg pro laufender Meter; Hinweis: Zwei Treppenlauftypen (1: 12 Steigungen; 2: 6 Steigungen)
195	104	Volumen - Treppenpodeste - Treppenhaus	$=((AG-1)*2)*1,2*2,5*0,2$	m <sup>3</sup>	Annahme: Treppenlaufdicke 20 cm
196	104	Volumen - Treppenläufe - Treppenhaus	$=((AG-1)*2)*(((0,1675^2+0,2714^2)^{0,5}*(6+12))*0,2*1,2$	m <sup>3</sup>	Annahme: Treppenlaufdicke 20 cm
198	004a	Volumen - Alternative Geschossdecken	$= (GB*GL-14,25)*(AG-1)*0,20$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Alternative Geschossdecken 20 cm
199	005a	Volumen - Alternative Dachgeschossdecke	$= GB*GL*0,2$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Alternative Dachgeschossdecke 20 cm
200	006a	Volumen - Rahmenkonstruktion Konstruktionsvollholz - Alternative Attika	$= ((GB*GL)*2+(GB*GL)*(1/0,6))*0,06*0,2$	m <sup>3</sup>	Hinweis: Querschnitt Konstruktionsvollholz 6 cm/20 cm
201	006a	Volumen - Dämmung - Alternative Attika	$= (GB*GL*1*0,2)-(((GB*GL)*2+(GB*GL)*(1/0,6))*0,06*0,2)$	m <sup>3</sup>	Hinweis: Querschnitt Konstruktionsvollholz 6 cm/20 cm

202	006a	Fläche - Beplankung Gipsplatten - Alternative Attika	$= (GB*2 + GL*2)*1*4$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Beidseitige Doppelbeplankung
203	009a	Fläche - Alternative Außenwände - oberirdische Geschosse - abzgl. Fensterflächen	$= (((2*GB) + (2*GL)) * (AOG*GHa) - (SF*1,2))$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Fensteröffnungen abgezogen
204	009a	Volumen - Alternative Außenwände - oberirdische Geschosse	$= (((2*GB) + (2*GL)) * (AOG*GHa) - (SF)*0,12$	m <sup>3</sup>	Annahme: Dicke Alternative Außenwand 12 cm
205	010a	Volumen - Alternative tragende Innenstützen	$= 0,16*0,16*LR*SIS*AG$	m <sup>3</sup>	Annahme: Querschnitt der Holzstütze ohne Beplankung 16 cm/16 cm
206	010a	Anzahl - Stahlverbindungen Stützenfüße - Alternative tragende Innenstützen	$= SIS*AG$	St	Annahme: Je Stütze ein Stützenfuß
207	010a	Masse - Stahlverbindungen Stützenfüße - Alternative tragende Innenstützen	$= SIS*AG*20$	kg	Geschätzte Annahme: 20 kg je Stützenfuß
208	010a	Anzahl - Stahlverbindungen Anschlussknoten Decke - Alternative tragende Innenstützen	$= SIS*AG$	St	Annahme: Je Stütze ein Deckenanschlussknoten
209	010a	Masse - Stahlverbindungen Anschlussknoten Decke - Alternative tragende Innenstützen	$= SIS*AG*20$	kg	Geschätzte Annahme: 20 kg je Deckenanschlussknoten
210	010a	Fläche - Alternative tragende Innenstützen	$= 0,16*4*LR*SIS*AG$	m <sup>2</sup>	Annahme: Querschnitt der Holzstütze ohne Beplankung 16 cm/16 cm
211	010a	Masse - Alternative tragende Innenstützen	$= (0,16*0,16*LR*SIS*0,38$	t	Annahme: Dichte Holzstütze 380 kg/m <sup>3</sup> (Quelle: Ökobaudat)
212	010a	Anzahl - Stahlverbindungen - Alternative tragende Innenstützen	$= SIS*AG*2$	St	Annahme: 2 Stahlverbindungen je Stütze
221	010a	Masse - Farbanstrich - Alternative tragende Innenstützen - in Kilogramm	$= 0,16*4*LR*SIS*AG*0,203$	kg	Annahme: Flächengewicht Farbe 0,142 liter/m <sup>2</sup> = 0,203 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe">https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe</a> )
213	012a	Fläche - Außenwand, innen - oberirdische Geschosse - abzgl. Fensterflächen	$= (((2*GB) + (2*GL)) * (AOG*LR) - (SF*1,2))$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster abgezogen
220	012a	Masse - Farbanstrich - Außenwandbekleidung, innen - oberirdische Geschosse - in Kilogramm	$= (((2*GB) + (2*GL)) * (AOG*LR) - (SF*1,2)) * 0,203$	kg	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster abgezogen; Annahme: Flächengewicht Farbe 0,142 liter/m <sup>2</sup> = 0,203 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe">https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe</a> )
228	012a	Fläche - Außenwand, außen - oberirdische Geschosse - abzgl. Fensterflächen	$= (AOG*GHa*(2*GB+2*GL)) - (SF*1,2)$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster berücksichtigt
229	012a	Volumen - Dämmung WDVS - Alternative Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$= (AOG*GHa*((2*GB)+(2*GL)) - (SF*1,2))*0,2$	m <sup>3</sup>	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster berücksichtigt

230	012a	Volumen - Armierungsputz WDVS - Alternative Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$= (AOG * GHa * ((2 * GB) + (2 * GL)) - (SF * 1,2)) * 0,004$	m <sup>3</sup>	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster berücksichtigt
231	012a	Masse - Putzgrundierung/Putzhaftvermittler WDVS - Alternative Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$= (AOG * GHa * ((2 * GB) + (2 * GL)) - (SF * 1,2)) * 0,37$	kg	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster berücksichtigt; Annahme: Flächengewicht Putzgrundierung 0,250 liter/m <sup>2</sup> = 0,37 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data">https://www.bauhaus.info/putzgrundierungen/knauf-putzgrund/p/15155462#product-data</a> )
232	012a	Volumen - Oberputz WDVS - Alternative Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$= (AOG * GHa * ((2 * GB) + (2 * GL)) - (SF * 1,2)) * 0,003$	m <sup>3</sup>	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster berücksichtigt
233	012a	Masse - Fassadenanstrich - Alternative Außenwandbekleidungen, außen - oberirdische Geschosse	$= (AOG * GHa * ((2 * GB) + (2 * GL)) - (SF * 1,2)) * 0,203$	kg	Hinweis: Wandöffnungen für Fenster berücksichtigt; Annahme: Flächengewicht Farbe 0,142 liter/m <sup>2</sup> = 0,203 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe">https://www.bauhaus.info/mineralfarben-silikatfarben/swingcolor-silikatfassadenfarbe/p/15119635?adb_search=silikatfarbe</a> )
214	101a	Volumen - Rahmenkonstruktion Konstruktionsvollholz - Innenwände - Alternativer Ausbau Aufenthaltsräume	$= (FAR^{0,5} * 4 * WEE * AWE) + (((10^{0,5}) * 4 * WEE) - (GB * 2 + GL * 2)) / 2 * AOG * (0,1 * 0,12 * (1 + 1 + (LR / 0,6)))$	m <sup>3</sup>	Annahme: Je laufender Meter Innenwand besteht die Rahmenkonstruktion aus zwei Längsbalken und einem Querbalken mit einem Achsabstand von 0,6 m
215	101a	Fläche - Beplankung Innenwand - Alternativer Ausbau Aufenthaltsräume	$= 4 * (((((FAR^{0,5}) * 4 * WEE * AWE) + (((10^{0,5}) * 4 * WEE) - (GB * 2 + GL * 2)) / 2) * LR * AOG) - (AOG * WEE * (AWE + 1)) * 0,885 * 2,01)$	m <sup>2</sup>	Hinweis: Innenwand ist vierfach beplankt
216	101a	Masse - Schüttung Bodenbelag - Alternativer Ausbau Aufenthaltsräume	$= (((FAR) * AWE * WEE * AOG) + (10 * WEE * AOG) + ((GB * GL - 14,25) * AUG) * 0,12 * 1850$	kg	Annahme: Schichtdicke Schüttung 12 cm; Annahme: Röhrichte Schüttung 1850 kg/m <sup>3</sup> (Quelle: Ökobaudat)
217	101a	Masse - Rippenstreckmetall Deckenputz - Alternativer Ausbau Aufenthaltsräume	$= (((FAR) * AWE * WEE * AOG) + (10 * WEE * AOG) + ((GB * GL - 14,25) * AUG) * 0,85$	kg	Hinweis: Küchen sind mit 10 m <sup>2</sup> berücksichtigt; Annahme: Flächengewicht Rippenstreckmetall 0,85 kg/m <sup>2</sup> (Quelle: <a href="https://www.obl.de/putztraeger/rippenstreckmetall-verzinkt-0-6-m-x-2-5-m/p/6275804#/">https://www.obl.de/putztraeger/rippenstreckmetall-verzinkt-0-6-m-x-2-5-m/p/6275804#/</a> )
218	101a	Volumen - Beplankungen OSB-Platten Innenwände - Alternativer Ausbau Aufenthaltsräume	$= ((((((FAR^{0,5}) * 4 * WEE * AWE) + (((10^{0,5}) * 4 * WEE) - (GB * 2 + GL * 2)) / 2) * LR * AOG) - (AOG * WEE * (AWE + 1)) * 0,885 * 2,01)) * 0,022$	m <sup>3</sup>	Hinweis: Küchen sind mit 10 m <sup>2</sup> berücksichtigt
219	101a	Volumen - Mineralwolle Innenwände - Alternativer Ausbau Aufenthaltsräume	$= (((((((FAR^{0,5}) * 4 * WEE * AWE) + (((10^{0,5}) * 4 * WEE) - (GB * 2 + GL * 2)) / 2) * LR * AOG) - (AOG * WEE * (AWE + 1)) * 0,885 * 2,01)) * 0,12) - ((((((FAR^{0,5}) * 4 * WEE * AWE) + (((10^{0,5}) * 4 * WEE) - (GB * 2 + GL * 2)) / 2) * AOG) * (0,1 * 0,12 * (1 + 1 + LR / 0,6)))$	m <sup>3</sup>	Hinweis: Volumen der Rahmenkonstruktion vom Gesamtvolumen der Innenwand abgezogen; Annahme: Je laufender Meter Innenwand besteht die Rahmenkonstruktion aus zwei Längsbalken und einem Querbalken mit einem Achsabstand von 0,6 m