

# Umweltkosten im Holzmodul- und Massivbau

Ein Vergleich der Lebenszyklus- und Umweltkosten eines Schulneubaus aus Brettsperrholzmodulen bzw. Stahlbeton

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades  
Master of Science (M. Sc.)  
an der Fakultät für Architektur/Ingenieur fakultät Bau, Geo Umwelt der  
Technischen Universität München.

**Betreut von** Kathrin Theilig, M. Sc. und Michael Vollmer, M. Sc.  
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

**Eingereicht von** Patricia Schönauer  
Regensburger Straße 12  
85309 Pörnbach  
+49 176 96032624

**Eingereicht am** München, den 22.12.2021



# 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

Frau Patricia Schönauer, Regensburger Straße 12, 85309 Pörnbach

– nachfolgend Autorin/Autor –

Die Autorin / der Autor wünscht, dass die von ihr/ihm an der TUM erstellte Masterarbeit mit dem Titel

Umweltkosten im Holzmodul- und Massivbau –  
Ein Vergleich der Lebenszyklus- und Umweltkosten eines Schulneubaus aus Brettsperrholzmodulen bzw. Stahlbeton

in Bibliotheken der TUM, einschließlich mediaTUM und die Präsenzbibliothek des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, Studenten und Besuchern zugänglich gemacht wird.

auf der Homepage des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen in Dateiform (PDF) passwortgeschützt zugänglich gemacht wird.

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 \_\_\_\_\_, den \_\_\_\_\_

.....

(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

Spätestens mit der Einführung der deutschen CO<sub>2</sub>-Steuer im Jahr 2021 rückte die Internalisierung von Umweltkosten und deren Berechnung in das Interesse der Öffentlichkeit. Insbesondere dem Bau- und Gebäudesektor wird eine große Verantwortung zur Reduktion schädlicher Umweltwirkungen zugesprochen. Dadurch stellt sich die Frage, ob die Internalisierung von Umweltkosten auch die Wettbewerbsfähigkeit umweltfreundlicher Konstruktionsweisen begünstigt.

Die vorliegende Arbeit widmet sich daher der Lebenszyklus- und Umweltkostenkalkulation im Hochbau und stellt zwei Konstruktionsvarianten des Praxisprojekts „Montessori Schule“ gegenüber. Das Originalgebäude der Firma LiWood in modularer Holzbauweise wird mit einem fiktiven Zwillingsgebäude aus konventionellem Stahlbeton verglichen. Um Basiswissen zur Bauweise aus Brettsper Holzmodulen sowie zu Umweltkosten zu vermitteln, werden diese Themen jeweils durch ein Grundlagenkapitel eingeführt. Die Lebenszykluskostenanalyse über Herstellung und Nutzung der beiden Konstruktionen zeigt, dass die Internalisierung von Umweltkosten im Hochbau eine Kostensteigerung von 13 bis 16 % bewirken kann. Die Berechnung der Umweltkosten basiert dabei auf Ökobilanzdaten der ÖKOBAUDAT und umfasst die Mid-Point-Indikatoren Globales Treibhauspotenzial (GWP), Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP), Potenzial zur Bildung für troposphärisches Ozon (POCP), Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP). Die Analyse zeigt, dass die Treibhauswirkung und damit die Wahl des zugehörigen Kostensatzes signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Der Indikator verursacht 84 bis 95 % der gesamten Umweltkosten. Zur Darstellung der hohen Varianz im Bereich der Umweltkostensätze erfolgt die Analyse mit minimalen sowie maximalen Kostensätzen aktueller einschlägiger Studien. Es werden die Umweltkosten beider Gebäudevarianten je  $m^2_{BGF}$  berechnet und deren Verteilung auf die Lebenszyklusphasen A1-3, B4, B6, C3-4 und D sowie auf wesentliche Bauteilgruppen analysiert. Abschließend wird der Umweltkostensatz für GWP [ $\text{€}/\text{kg CO}_2 - \text{Äq.}$ ] berechnet, welcher notwendig wäre, um durch eine Internalisierung die höheren Bau- und Lebenszykluskosten der Holzmodulbauweise auszugleichen und damit ein ökonomisches Gleichgewicht sicherzustellen.

# Summary

## 0. Abstract

Due to the introduction of the German CO<sub>2</sub> tax in 2021, the internalization of environmental costs (EC) and their calculation became a matter of public interest. The construction sector in particular has a major responsibility for reducing harmful environmental impacts. This raises the question whether the internalization of environmental costs can also promote the competitiveness of modular timber constructions.

Therefore, the thesis is dedicated to life cycle and environmental costing. It compares two construction types of the LiWood-project "Montessori School". The original building in modular timber construction is compared with a fictional twin building made of conventional reinforced concrete. To convey general knowledge about the construction method using cross-laminated timber modules and about environmental costs, a basic chapter introduces these topics.

The life cycle cost analysis of the production and use of the two constructions shows that the internalization of environmental costs in building construction can result in a cost increase of 13 to 16%. The calculation of environmental costs is based on life cycle assessment data from ÖKOBAUDAT and includes the mid-point indicators global warming potential (GWP), ozone depletion potential (ODP), photochemical oxidation potential (POCP), acidification potential (AP) and eutrophication potential (EP). This analysis shows a significant influence of GWP and thus the choice of the associated cost rate. The indicator causes 84 to 95% of the total environmental costs. To reflect the high variance in the range of environmental cost rates, the analysis is performed with minimum as well as maximum cost rates of current relevant studies. The environmental costs of both construction types are calculated and their distribution among the life cycle phases A1-3, B4, B6, C3-4 and D and among major building component groups is analysed. Finally, the level of the environmental cost rate for GWP is changed. It is calculated, at which level the cost rate would compensate the higher construction costs of the modular timber construction method through internalization and thus ensure an economic advantage.

## 1. Introduction and aim of the paper

In 2020, extreme weather, natural disasters, biodiversity loss, anthropogenic environmental disasters and the failure of climate protection measures are declared as the five most likely global disasters (World Economic Forum, 2020, Figure 1). The latest assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change confirms that anthropogenic activity causes global warming and developments can only be limited by radically reducing greenhouse gas emissions to net zero (International Panel on Climate Change [IPCC], 2021)

The building and construction industry has a special responsibility in this context, as it generates about 38% of energy-related CO<sub>2</sub> emissions worldwide and thus has significant potential for reduction. As shown in Figure 1, 28% of emissions are related to the use of buildings. In addition, the construction sector accounts for about 10% of global emissions due to the production of building materials. These are mainly caused by energy-intensive and therefore emission-intensive materials such as glass, cement and steel. (United Nations Environment Programme, 2020, S. 4)

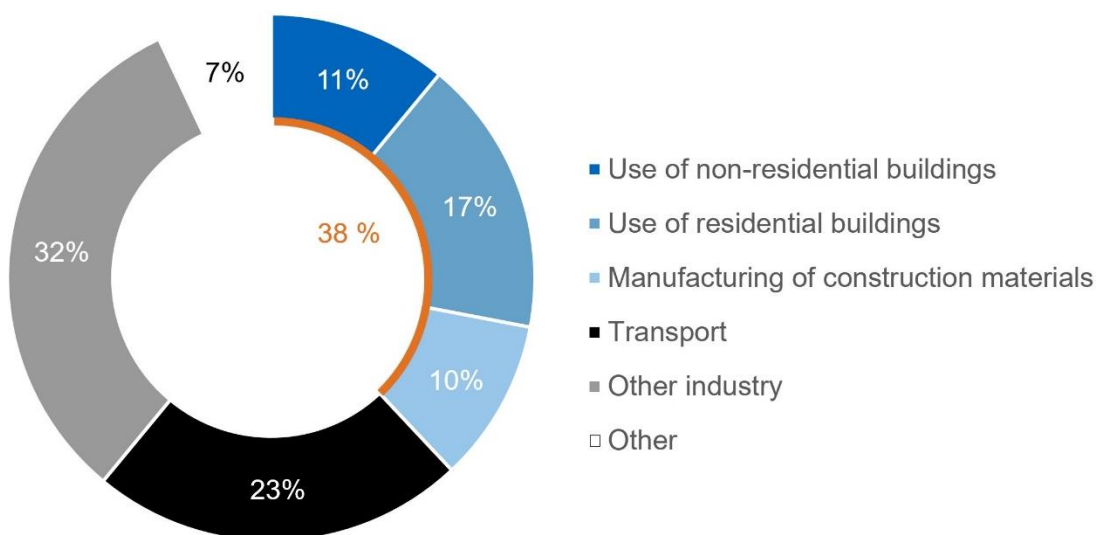


Figure 1: Global energy-related CO<sub>2</sub>-emission in 2019 according to (United Nations Environment Programme, 2020, S. 4)

The construction of sustainable buildings often means higher initial investment costs due to necessary additional measures such as renewable energy generation systems, consulting and certification services or the selection of environmentally compatible and regional building materials.



In the whole German economy, additional investments of up to 2.3 trillion euros are required to achieve at least 95% of the climate neutrality targets by 2050 (Gerbert et al., 2018). However, failure in conservation also generates costs for society to compensate damage caused to human health and environment (Umweltbundesamt, 2021)

In addition to subsidies, politicians also use instruments like the EU taxonomy, the EU Emissions Trading System (EU-ETS) or the German Fuel Emissions Trading Act (Brennstoffemissionshandelsgesetz – BEHG) as investment incentives. Currently, this affects the construction and real estate industry in heat generation using fossil fuels. But also the energy-intensive production of certain building materials is subject of the EU-ETS. (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2020)

In general, environmental damages and the corresponding costs for e.g., health damage, crop or biodiversity losses have to be financed by the ecosystem and the society. The so-called internalization allocates environmental costs (EC) according to the polluter-pays-principle. The German Federal Environment Agency clearly points out that an internalization of EC is necessary to avoid a distortion of competition of environmentally compatible products. This is poorly implemented by the currently used political instruments. (Umweltbundesamt, 2021)

Since the calculation of environmental damage is a complex process, it requires interdisciplinary expertise. Not everyone involved in a construction project has this knowledge. That often leads to a lack of understanding of the environmental parameters such as impact indicators of a life cycle assessment. Furthermore, the actual impact of environmentally harmful emissions often affects future generations or uninvolved third parties. (Rathmann et al., 2019, S. 3)

Monetizing environmental impacts can therefor serve to communicate environmental aspects in an understandable way and encourage consideration in planning (Pizzol et al., 2017).

To illustrate how the internalization of EC influences the economic viability of a modular timber construction, the master's thesis is dedicated to the life cycle and environmental cost analysis of buildings. The aim is to quantify and compare LCC and EC of two different construction types of a building. Thereby, knowledge shall be gained about the share of costs that a building construction project causes over its life cycle at the expense of the society. The focus of the investigation is on the EC that are inherent in the

construction and building materials. The following research questions need to be answered:

1. Does a modular timber building have lower life cycle and environmental costs than a conventional solid building made of mineral building materials?
2. Does internalization of current environmental cost rates generate an economic advantage for modular timber construction?

## 2. State of the art

A definition for the term "environmental costs" (EC) is provided by various relevant studies as well as a new draft of ISO/DIS 21931-1, which describes the terms "external costs", "environmental cost", "social cost" and "externality", which mainly cover the topic (ISO, 2021). Externalities (also: external effects) describe the uncompensated effects of an economic activity on uninvolved parties. These effects can be both, positive (benefits) and negative (damages/costs). The consequences of environmental pollution, for which the polluter does not pay, can thus be referred to as negative externalities or, in monetized form, as external costs. (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [BMVBS], 2010, S. 22–24)

In these days, there is a small proportion of EC in Germany that have been internalized according to the polluter-pays principle.

As early as 2005, the European Emissions Trading System (EU-ETS) was introduced as an important instrument of EU climate policy and is currently the largest international market for CO<sub>2</sub> trading. The aim of the system is to reduce greenhouse gas emissions through monetary incentives and thus contribute to the EU's climate neutrality efforts. (European Commission, 2021)

According to the directive, operators of certain emission-intensive industries have to provide certificates for each ton of CO<sub>2</sub>-equivalent emitted. The maximum limit of emitted greenhouse gases is set by the directive using the "cap and trade"-principle. The EU-ETS covers for example, energy production using fossil fuels, refineries, production of iron, steel, aluminium, cement, gypsum, glass, bricks and mineral fibres, pulp and paper production and the chemical industry. Still, a high proportion of the certificates is issued free of charge to plant operators. If more CO<sub>2</sub> is emitted than a plant has received in free certificates, the missing amount must be purchased at auction. (BMW, 2020)

The more stringent climate targets and the associated reduction in free certificates have led to a significant increase in certificate prices (European Commission, 2021). In the first half of 2021, the average price was €44.60 per metric ton of CO<sub>2</sub>-equivalent (Deutsche Emissionshandelsstelle [DEHSt], 2021, S. 7).

The German BEHG serves to cover further emission-intensive sectors that have not been included in the EU-ETS to date. The law, which has been in force since 2021, regulates CO<sub>2</sub> pricing for fossil heating and fuels such as diesel, gasoline or heating oil and thus specifically affects the transport sector and building use. (BMW, 2020)

The current cost rate of €25 per metric ton of CO<sub>2</sub> will rise to a maximum of €65 by 2026 in accordance with the agreed sliding scale (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG, 2020, § 10).

These two systems are criticized for insufficiently internalizing actual EC from an eco-political perspective. In this context, the principle of EC internalization is seen as suitable to trigger a paradigm shift towards environmentally compatible construction and operation and to eliminate the competitive distortion of environmentally friendly products. (Umweltbundesamt, 2021)

According to the current state of the art in Germany, environmental costs

- are increasingly internalized in the form of CO<sub>2</sub> taxes,
- are used to evaluate (environmental) policy measures such as large-scale transport and energy projects and
- have so far generally not been included in profitability calculations in the buildings sector, despite the high potential.

The new publication "Climate cost modelling" by the German Federal Environment Agency analyses approaches to climate cost modelling and provides guidance for their political use (Oberpiller et al., 2021). Modelling new environmental cost rates is not part of this thesis, although some basic knowledge of principles for the application of existing cost rates is necessary. It is important to distinguish between damage and mitigation frameworks.

Damage cost rates monetize a reduced environmental or health status and thus the cost to society of the lost benefits. The calculation of damage costs requires complex models to represent the impact chains. Various calculation models exist in science. This approach contrasts with avoidance costs. These represent the economic cost of measures to limit certain emissions. They are not directly related to the damage itself. The basis

for this is the assumption of a certain target value to which the emission is to be limited. The avoidance costs should rather be seen as a lower limit of the actual environmental costs. In general, both approaches cannot exhaustively capture all damages and impacts and thus usually represent only a part of them. Overall, it can be expected that the real costs of negative environmental impacts are higher. (Bünger & Matthey, 2018, p. 14, 35-38)

Buildings can cause environmental impacts over the entire life cycle and thereby cause the above-mentioned damages or necessitate avoidance costs. By performing a life cycle assessment (LCA), these effects can be calculated and afterwards monetized with environmental cost rates from relevant literature. If the LCA is performed using ÖKO-BAUDAT, the selection of existing environmental cost rates is limited to studies that monetize the so-called Mid-Point-Indicators (Schneider-Marin & Lang, 2020, S. 1641).

### 3. Methodology

To answer the research questions, two construction types of one building are analysed. The company LiWood AG provides planning and cost data of the school building "Montessori School". The school is balanced on the one hand in its original building method using cross laminated timber modules. On the other hand, the life cycle costs (LCC) and environmental costs (EC) of a fictional twin building in conventional mineral construction are compared. For both construction types, identical building geometry, technical equipment and supply systems as well as energy standards are assumed.

Figure 2 shows the methodology used for LCC calculation. The LCC contain costs for construction (cost group 300 and 400 according to DIN 276) and usage (cost groups 311-316, 321, 331-333, 352, 353, 410 and 420 according to DIN 18960). The construction costs for the original "Montessori School" are provided by LiWood while the cost planner 2021 of the Baukosteninformationszentrum (BKI) serves as database for the mineral construction type. The BKI provides minimum, mean and maximum average construction costs for special schools. Cost rates of building operation are taken from the "Bewertungssystem für Nachhaltiges Bauen" (BNB) for school buildings, which serves as guideline for all calculations.

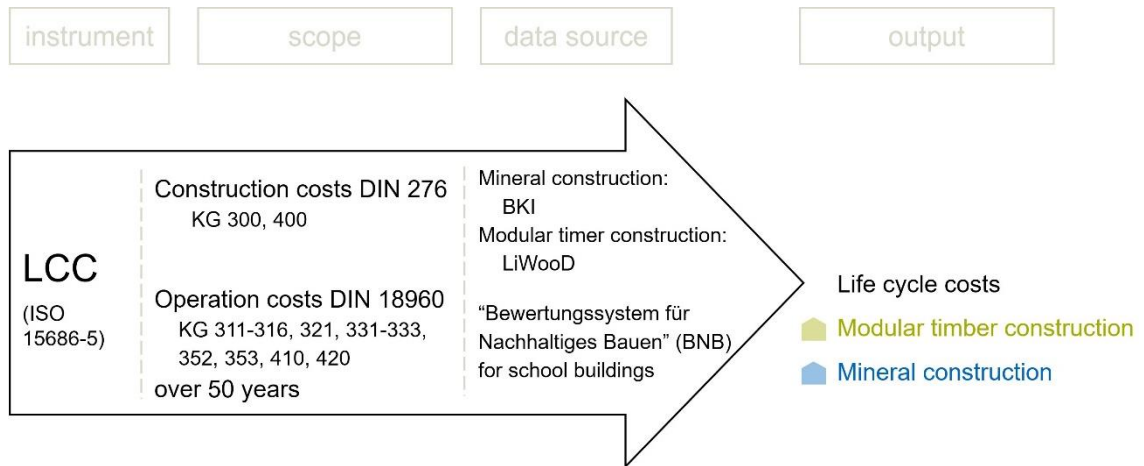


Figure 2: Methodology for calculating life cycle costs (LCC) (own figure)

As illustrated in Figure 3, a life cycle assessment (LCA) of both construction types is performed in order to estimate the environmental impacts. The indicators global warming potential (GWP), ozone depletion potential (ODP), photochemical oxidation potential (POCP), acidification potential (AP) and eutrophication potential (EP) are analysed in product stage (A1-3), replacement (B4), operational energy use (B6), waste processing (C3) and disposal (C4). Benefits and loads beyond the system boundary (D) are calculated separately. For the LCA, data from ÖKOBAUDAT 2021 II is used (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat & Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung [BBSR], 2021). The resulting Mid-Point-Indicators serve as input for the EC calculation to get monetized by environmental cost rates from Schneider-Marin und Lang and Sustainability Impact Metrics, respectively (Schneider-Marin & Lang, 2020; Sustainability Impact Metrics, 2021).

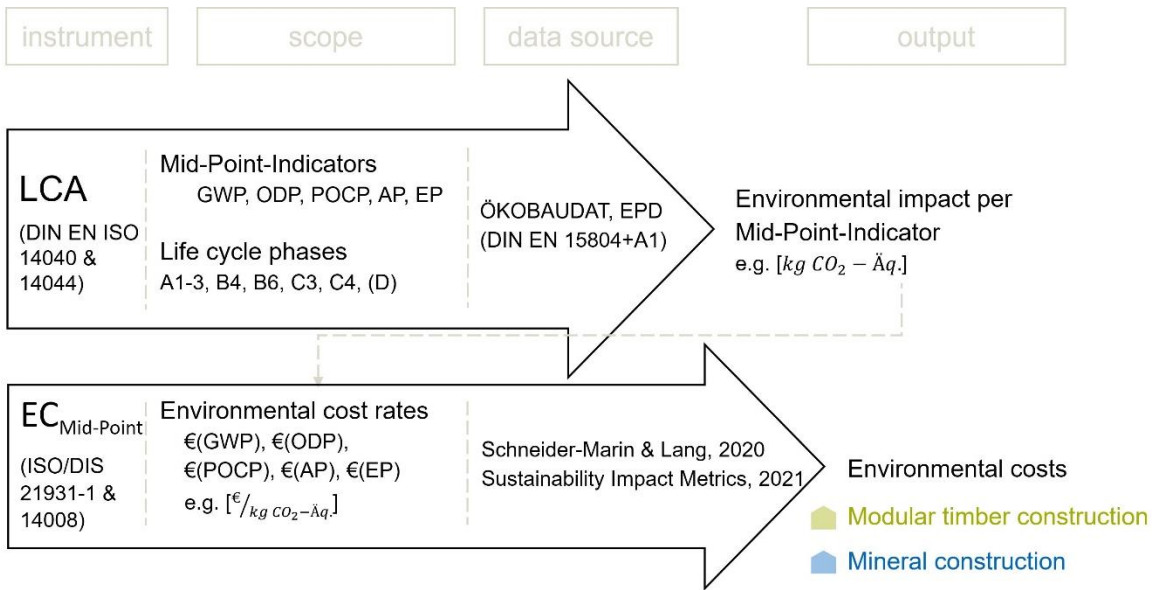


Figure 3: Methodology for calculating environmental costs (EC) (own figure)

Figure 4 gives an overview of the considered life cycle phases in the LCC and LCA calculation.

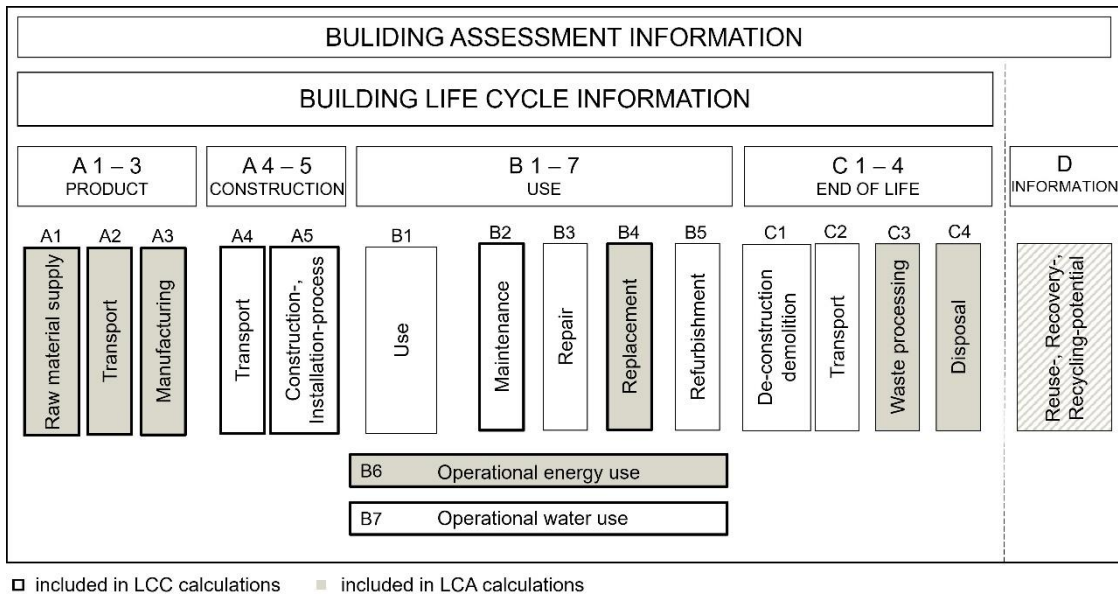


Figure 4: Life cycle phases according to DIN EN 15804 with marking of phases considered in LCC and LCA calculations (own figure according to Schneider-Marin & Lang, 2020, S. 1641)

## 4. Conduction

To draw a comparison between modular timber construction and mineral construction methods, the original building is balanced on the one hand and a fictional twin building of reinforced concrete on the other hand. Figure 5 shows a rendering of the original building.



**Figure 5: Rendering of the "Montessori School" (Corestate Capital Group, 2021)**

The essential dimensions of the building remain the same. Only the wall and ceiling thicknesses, the required insulation thicknesses and the floor structure are adapted to the construction system in the LCA. The U-values of the original modular timber building serve as a reference value for achieving comparable energy standards. Since the considerations of this work are focused on the type of construction, no modifications are made with respect to the technical building equipment. Table 1 summarizes key data of the "Montessori School".

Table 1: Key data of "Montessori School"

Project name	Montessori School
Function	Integrative School, full-day care and kindergarten according to the Montessori concept for up to 544 children
System boundary	Upper edge of the underground parking garage ceiling and entrance (calculation of the building construction only, without foundations, basement and outdoor facilities)
Construction	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Original building: Modular timber construction made of cross-laminated timber, timber facade (fibre cement facade on staircase cores)</li> <li>▪ Fictional twin: reinforced concrete, thermal insulation composite system</li> </ul>
Area according to DIN 277	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gross floor area (BGF – ger.: Bruttogrundfläche): 3590 m<sup>2</sup></li> <li>▪ Net floor area (NRF – ger.: Nettoraumfläche): 2940 m<sup>2</sup></li> <li>▪ Usable floor area (NUF – ger.: Nutzfläche): 2290 m<sup>2</sup></li> </ul>
Energy standard	<p>KfW 55</p> <p>U-values:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>U_{\text{external wall}} \cong 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}</math></li> <li>▪ <math>U_{\text{roof}} \cong 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}</math></li> <li>▪ <math>U_{\text{floor slab}} \cong 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}</math></li> </ul>
Energy and power supply	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2x air-to-water heat pump</li> <li>▪ 260 m<sup>2</sup> photovoltaic system for own use (no feed-in tariff calculated)</li> <li>▪ Additional final energy: electricity mix Germany</li> <li>▪ Instantaneous water heater at water transfer stations</li> <li>▪ Flat radiators</li> </ul>
Deviating Assumptions	Gravel ballast (calculated in both LCAs of the construction types) instead of roof garden (actually built)



Based on this key data and the described methodology, the LCC are calculated and a LCA is performed for both construction types of "Montessori School". The LCA results shown in Table 2 and

Table 3 serve as input data for the EC calculation.

**Table 2: Results of the life cycle assessment of the "Montessori School" as modular timber construction type**

	<b>Einheit</b>	<b>A1-A3</b>	<b>B4</b>	<b>B6</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>D</b>
<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	-8,07E+05	4,56E+05	1,58E+06	1,53E+06	2,11E+04	-9,90E+05
<b>ODP</b>	kg R11-Äq.	1,28E-02	7,17E-03	1,71E-07	4,05E-08	5,70E-05	-6,82E-05
<b>POCP</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq.	3,14E+02	1,41E+02	1,77E+02	2,35E+00	3,58E+00	-1,04E+02
<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	2,28E+03	1,49E+03	2,16E+03	2,59E+01	4,53E+01	-1,31E+03
<b>EP</b>	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	4,00E+02	1,65E+02	4,26E+02	4,73E+00	6,41E+00	-2,04E+02

**Table 3: Results of the life cycle assessment of the "Montessori School" as reinforced concrete construction**

	<b>Einheit</b>	<b>A1-A3</b>	<b>B4</b>	<b>B6</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>D</b>
<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	7,97E+05	4,96E+05	1,58E+06	9,71E+04	2,61E+04	-6,22E+05
<b>ODP</b>	kg R11-Äq.	2,23E-02	1,05E-02	1,71E-07	8,83E-08	5,70E-08	-2,62E-06
<b>POCP</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq.	2,63E+02	1,57E+02	1,77E+02	3,19E+00	4,57E+00	-1,05E+02
<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	2,25E+03	1,83E+03	2,16E+03	3,44E+01	5,70E+01	-1,12E+03
<b>EP</b>	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	3,09E+02	1,85E+02	4,26E+02	6,52E+00	8,48E+00	-1,42E+02

The estimated environmental impacts are monetized by a minimum and a maximum dataset of environmental cost rates. The used cost rates are listed in Table 4.

**Table 4: Environmental cost rates for monetizing the calculated environmental impacts per mid-point indicator**

<b>Mid-Point-Indicator</b>	<b>Unit</b>	<b>Maximum environmental cost rates</b> (Schneider-Marin & Lang, 2020)	<b>Minimum Environmental cost rates</b> (Sustainability Impact Metrics, 2021)
<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> -eq.	0,68 €/ kg CO <sub>2</sub> -eq.	0,116 €/ kg CO <sub>2</sub> -eq.
<b>ODP</b>	kg R11-eq.	30,00 €/ kg R11-eq.	(no value given)
<b>POCP</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.	10,02 €/ kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.	9,08 €/ kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.
<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> -eq.	15,04 €/ kg SO <sub>2</sub> -eq.	8,75 €/ kg SO <sub>2</sub> -eq.
<b>EP</b>	kg PO <sub>4</sub> -eq.	18,52 €/ kg PO <sub>4</sub> -eq.	4,70 €/ kg PO <sub>4</sub> -eq.

For EC calculation of the use phase (B4, B6) a discount rate must be selected. This is also requested in DIN EN ISO 14008. For the conducted calculation a discount rate of 0% is chosen. This is due to the assumption that damage to future generations should be included in the balance sheet with the same weighting as damage to present generations. Under the principle of sustainability, the welfare of people today and in future is to be given equal priority (The World Commission on Environment and Development, 1987). It is assumed that potentially higher welfare in future, which could reduce the value of costs calculated in today's currency and time dimension, will be offset by other effects.

For example, a recent study by Kikstra et al. shows a significantly high impact of climate change on economic growth. Taking long-term economic effects into account, the environmental costs of carbon are estimated to be as high as 2800 €/ t CO<sub>2</sub>. (Eichhorn, 2021; Kikstra et al., 2021)

## 5. Results

Figure 6 compares life cycle costs (LCC) of the modular timber construction and solid construction variants, which contain manufacturing and operation costs. The BKI cost planner, which is the source of the manufacturing costs in mineral construction, offers a minimum, a mean and a maximum value. Depending on the comparative value, the LCC of the modular timber construction corresponds to 100, 111 or 122 % of the costs for mineral construction. According to the experiences of LiWood, the production costs are also 4 to 46 % higher than those of competing suppliers in conventional solid construction. In the case of price-only awards, the contract would therefore not be won by the timber module construction company.

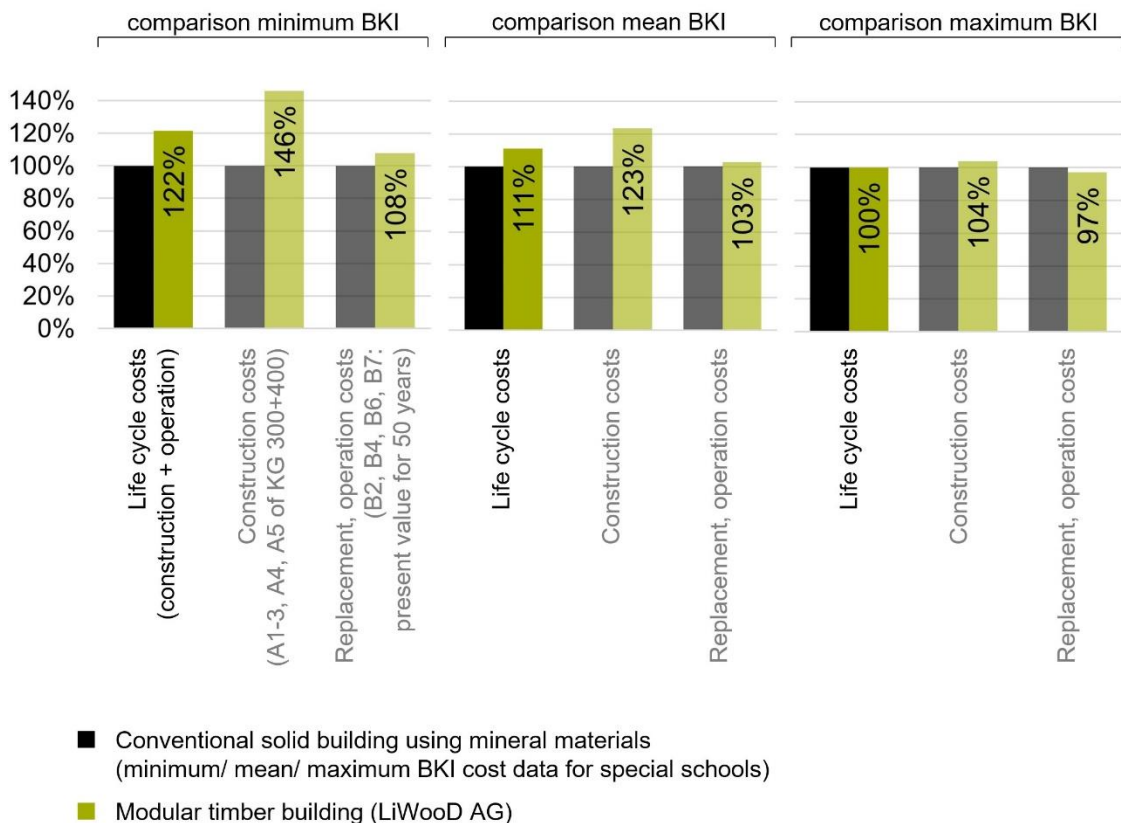


Figure 6: Comparison of life cycle, manufacturing and usage costs of the construction types modular timber building and solid building (own figure)

With the evaluation of Figure 6, part of the first research question can be answered:

*The "Montessori School" in timber modular construction has higher life cycle costs than a comparable building in conventional solid construction using mineral building materials, if low or mean costs in solid construction are assumed. In these cases, the LCC of*

the timber modular building is 22% (min. BKI cost rates) or 11% (mean BKI cost rates) higher. The life cycle costs of a solid construction with high manufacturing costs (maximum cost rates according to BKI) correspond approximately to the life cycle costs of the modular timber building "Montessori School".

Over the entire life cycle (A1-3, B4, B6, C3-4), the EC of the solid construction type are around €150,000 higher than the EC of the timber modular construction. This corresponds to about 7% higher EC. The following Figure 7 shows the calculated environmental costs per square meter gross floor area [m<sup>2</sup>BGF] broken down by life cycle phases and construction type. For the timber modular construction, the EC over the life cycle (A1-3, B4, B6, C3-4) amount to €558 per m<sup>2</sup>BGF, while the solid construction is endowed with €600 per m<sup>2</sup>BGF. In both variants, the EC of the final energy demand over 50 years (phase B6) has the highest share (52% in the solid construction, 56% in the modular timer construction). Since the same final energy consumption, the same technical building equipment as well as the same energy standard are assumed for both constructions, the environmental costs of operation are equal at €311 per m<sup>2</sup>BGF.

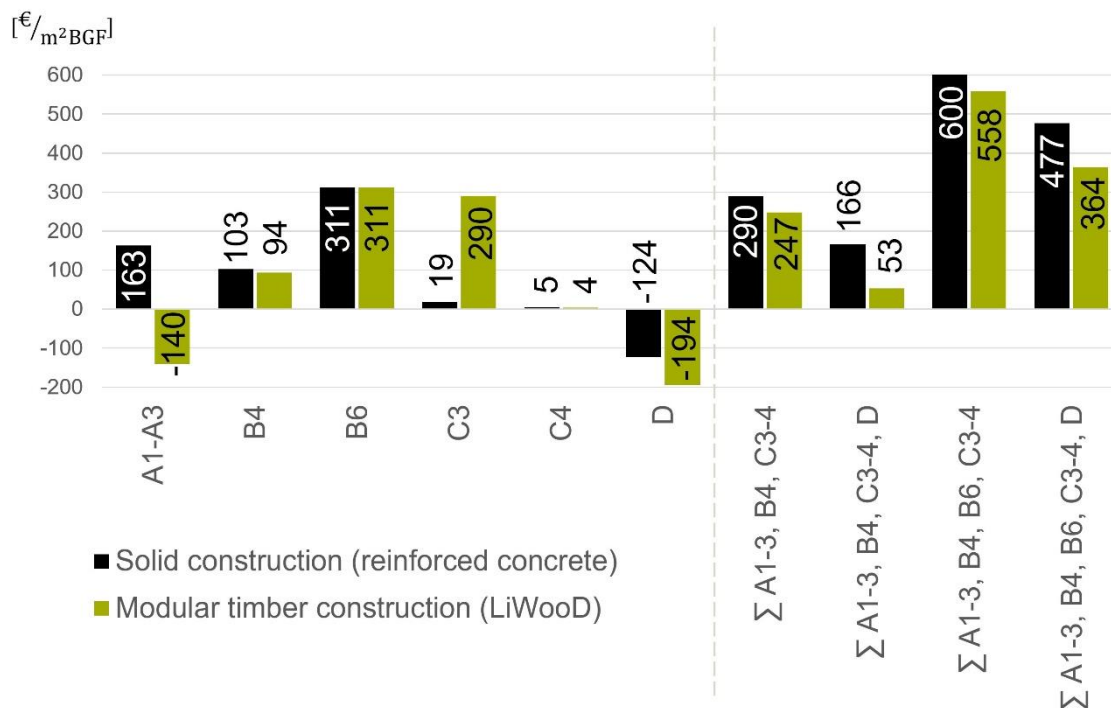


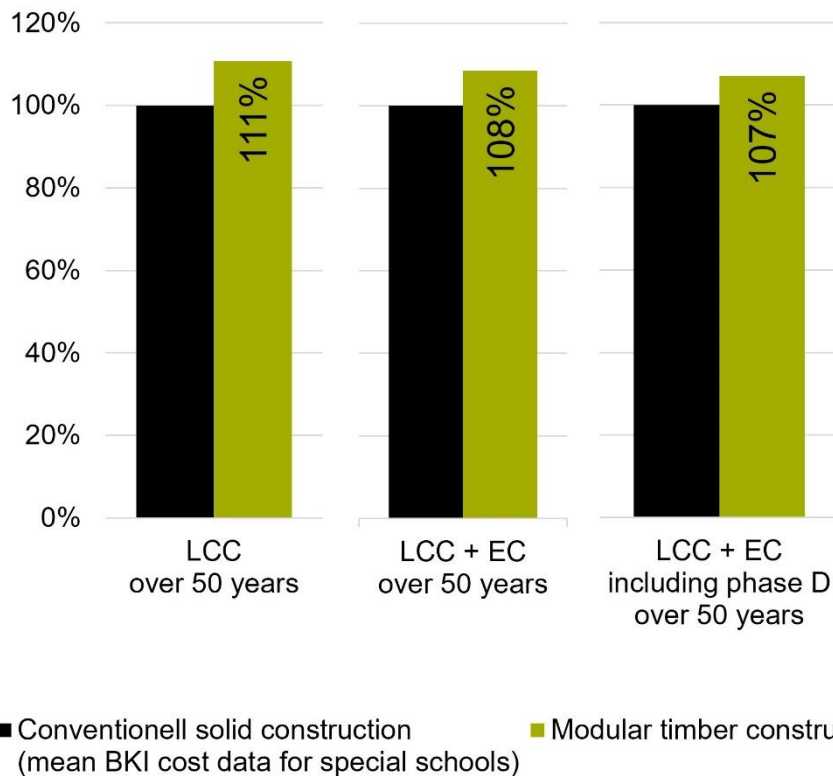
Figure 7: Results of the environmental cost calculation per spare meter gross floor area [€/m<sup>2</sup>BGF] divided by Mid-Point-Indicators (own figure)

Life cycle phase D captures some of the benefits that extend beyond the system boundary of the building life cycle. These include, for example, the substitution of fossil fuels

by thermal utilization of renewable building materials with heating value. When this module is included, the benefits of solid wood construction become evident. The EC are reduced by €194 per m<sup>2</sup>BGF (equivalent to -35 %) to €364 per m<sup>2</sup>BGF when phase D is included in the modular timber construction. Also in solid construction, phase D receives a cost advantage of -€124 per m<sup>2</sup>BGF (equivalent to -21 %) and reduces the total environmental cost to €477 per m<sup>2</sup>BGF. To focus on the construction material, the EC of the final energy demand (phase B6) is excluded from the consideration due to the identical value for both constructions. Under these considerations, the modular timber construction offers an environmental cost advantage of €113 per m<sup>2</sup>BGF compared to the conventional construction made of reinforced concrete. The EC of the modular timber construction over the sum of phases A1-3, B4, C3-4 and D is about €53 per m<sup>2</sup>BGF while the solid construction causes €166 per m<sup>2</sup>BGF.

With these research insights, the second part of the first research question can be answered:

*A building in modular timber construction causes higher life cycle costs than a building in conventional solid construction made of mineral building materials, but the environmental costs result in a lower value. If the credits of life cycle phase D are excluded, the timber modular building generates EC of €558 per m<sup>2</sup>BGF. This is about €42 per m<sup>2</sup>BGF less than a reinforced concrete construction (€600 per m<sup>2</sup>BGF) of the "Montessori School" causes. If the credits of phase D are considered, the environmental cost advantage of the modular timber construction increases to €113 per m<sup>2</sup>BGF.*



**Figure 8: Cost comparison of the modular timber construction to life cycle costs (LCC) according to mean BKI cost data and environmental costs (EC) of the reinforced concrete twin (own figure)**

Finally, the second research question is answered by means of Figure 8:

*By internalizing the calculated maximum environmental costs (according to Schneider-Marin und Lang) the average solid construction (mean BKI cost data) remains the cheaper variant over the life cycle. Considering environmental costs (A1-3, B4, B6, C3-4), the modular timber construction records 8% higher total costs than the reinforced concrete construction. Even considering the credits of phase D in environmental cost calculation, the solid construction is 7% cheaper. In comparison with the expensive solid construction type (maximum BKI cost data), the internalization of environmental costs (A1-3, B4, B6, C3-4) leads to a minimal cost advantage (0.9 %) of the modular timber building.*

To be able to reflect a monetary advantage of modular timber construction through internalization of EC, an environmental cost rate for global warming potential of €6.90 per kg CO<sub>2</sub>-eq. would be necessary. This is factor 10,15 higher than the original value of €0.68 per kg CO<sub>2</sub>-eq. If benefits of phase D are considered in EC calculation, a GWP-cost-rate of €2,55 per kg CO<sub>2</sub>-eq. leads to a balanced economic efficiency of both construction types.

## 6. Discussion

The approach of the environmental cost calculation applied in this thesis is fundamentally to be criticised for its orientation towards the principle of weak sustainability. The calculation of environmental costs of a building is intended to serve as simple and easy-to-understand communication of environmental aspects and, in the case of internalisation, to increase the competitive opportunities of environmentally friendly measures. In doing so, it must not be mistakenly assumed that environmental damage can be offset by the payment of an additional fee. Both life cycle assessments and environmental cost rates cover only a part of the actual environmental impacts and not all environmental damage can be monetized. Especially the damage cost rates for greenhouse gas emissions show a considerable range and differ greatly in their amount depending on the included damage effect. (Bünger & Matthey, 2020; Schneider-Marin & Lang, 2020)

The analyses carried out in the context of this master thesis reveal various weaknesses and potential for improvement. These are pointed out at the appropriate chapter and documented according to the principle of transparency. The weaknesses include, for example, uncertainties, simplifications or accepted deviations in the cost data of BKI, LCA data sets or planning data for "Montessori School". Due to focusing on costs exclusively, no revenues or profits were calculated for the "Montessori School" project. This means that essential advantages of the modular timber construction are not included in the considerations. These benefits include the short construction time, the early rentability as well as ecological advantages such as long-term CO<sub>2</sub> storage or EC benefits for ecosystem services of sustainably managed forests.

## 7. Conclusion

The conducted study can confirm that environmental costs (EC) are highly relevant in the building sector and can increase life cycle costs by 13 to 16 % by internalisation. In the case of the "Montessori School", however, very high environmental cost rates would be necessary to equalise the economic efficiency of the modular timber construction with a conventional reinforced concrete construction. Due to the high production costs and thus LCC of the "Montessori School" per m<sup>2</sup>BGF, the ratio and influence of the calculated EC to overall costs is low. The internalisation of environmental costs in

projects with very high production costs and therefore high LCC per m<sup>2</sup>BGF can only increase the economic efficiency of the modular timber construction if

- either the LCC advantage of the solid construction is low,
- the EC advantage of the modular timber construction is quite high
- or very high environmental cost rates for GWP are used.

Therefore, investigation on further environmental indicators beyond GWP, ODP, POCP, AP and EP is necessary. The BMVBS also refers to further need for research in its 2010 study about external Costs in building construction (BMVBS, 2010, S. 12). For the application of environmental cost calculation at building level, there are no commonly accepted and easily applicable methods or standardised environmental cost rates. The development of a standard and software with a link to LCA databases could promote the establishment in building practice.



## 8. References

- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat & Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.). (2021). *ÖKOBAUDAT 2021-II*. <https://www.oeko-baudat.de/>
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. (2010). *Externe Kosten im Hochbau. BMVBS-Online: Bd. 2010,17*. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvbs/bmvbs-online/2010/ON172010.html;jsessionid=525F4982D4318CF7452954D46785EE34.live11292>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.). (2020). *Wie funktioniert eigentlich der Europäische Emissionshandel?* <https://www.bmwi-energie-wende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/08/Meldung/direkt-erklaert.html>
- Bünger, B. & Matthey, A. (2018). *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten: Methodische Grundlagen*. Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-30-zur-ermittlung-von-0>
- Bünger, B. & Matthey, A. (2020). *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten: Kostensätze*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-umweltkosten>
- Corestate Capital Group (Hrsg.). (2021). *ECHO München: Montessori-Schule in Holzmodulbauweise*. <https://echo.corestate-capital.com/#holzmodule>
- Deutsche Emissionshandelsstelle (Hrsg.). (2021). *Auktionierung: Deutsche Versteigerungen von Emissionsberechtigungen*. Zweites Quartal 2021. [https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/versteigerung/2021/2021\\_Bericht\\_Q2.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/versteigerung/2021/2021_Bericht_Q2.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (2020). <http://www.gesetze-im-internet.de/behg/index.html#BJNR272800019BJNE001201125>
- Eichhorn, C. von (6. September 2021). Klimawandel könnte bis zu sechsmal teurer werden. *Süddeutsche Zeitung*. <https://www.sueddeutsche.de/wissen/hochwasserkatastrophe-schaeden-kosten-klimawandel-co2-preis-hurrikan-1.5402770>
- European Commission (Hrsg.). (2021). *Strukturelle Reform des EU-Emissionshandels-systems*. [https://ec.europa.eu/clima/policies/reform\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/reform_de)
- Gerbert, P., Herhold, P., Burchard, J., Schönberger, S., Rechenmacher, F., Kirchner, A., Kemmler, A. & Wunsch, M. (2018). *Climate Paths for Germany: English Summary*. <https://www.bcg.com/de-de/publications/2018/climate-paths-for-germany-english>
- International Panel on Climate Change. (2021). *Sixth Assessment Report: Working Group I - The Physical Science Basis*. Headline Statements from the Summary for Policymakers. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Headline\\_Statements.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Headline_Statements.pdf)
- ISO (2021). *Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken - Rahmenbedingungen für Methoden zur Bewertung der umweltbezogenen, sozialen und ökonomischen Qualität von Bauwerken als Grundlagen für die Nachhaltigkeitsbewertung: Teil 1: Gebäude* (ISO/DIS 21931-1:2021(E)).
- Kikstra, J. S., Waidelich, P., Rising, J., Yumashev, D., Hope, C. & Brierley, C. M. (2021). The social cost of carbon dioxide under climate-economy feedbacks and temperature variability. *Environmental Research Letters*, 16(9), 94037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1d0b>
- Oberpiller, Q., Peter, M., Füssler, J., Zimmer, A., Aboumehboub, T., Schleypen, J., Gidden, M., Schaeffer, M., Scheussner, C.-F. & Schwarze, R. (2021). *Climate*

*cost modelling: Analysis of damage and mitigation frameworks and guidance for political use.* Dessau-Roßlau. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc\\_68-2021\\_climate\\_cost\\_modelling.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_68-2021_climate_cost_modelling.pdf)

- Pizzol, M., Laurent, A., Sala, S., Weidema, B., Verones, F. & Koffler, C. (2017). Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(6), 853–866. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1199-1>
- Rathmann, J., Dubrow, C. & Eberhardt, A. (2019). *Naturkapital Bayern: Machbarkeitsstudie zur ökonomischen Bewertung von Naturkapital und Ökosystemleistungen in Bayern: Ein landnutzungsbasierter Bewertungsansatz am Beispiel des bayerischen Vertragsnaturschutzprogramms* [Schlussbericht]. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg. <https://www.lfu.bayern.de/natur/oekosystemleistungen/machbarkeitsstudie/index.htm>
- Schneider-Marín, P. & Lang, W. (2020). Environmental costs of buildings: monetary valuation of ecological indicators for the building industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(9), 1637–1659. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01784-y>
- Sustainability Impact Metrics. (2021). *The way eco-costs of emissions are determined.* <https://www.ecocostsvalue.com/eco-costs/eco-costs-emissions/>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2021). *Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen.* <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umwelt-kosten>
- United Nations Environment Programme. (2020). *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector.* [https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR\\_FULL%20REPORT.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf)
- The World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future: Brundtland-Bericht.* <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>
- World Economic Forum (2020). *The Global Risks Report 2020: 15th Edition.* [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Global\\_Risk\\_Report\\_2020.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf)

# Inhaltsverzeichnis

1. Einführung .....	1
2. Forschungsgegenstand und Methodik .....	5
3. Modularer Holzbau - Grundlagen .....	10
3.1. Definition Modulbau .....	10
3.2. Holzmodulbau der LiWood AG .....	12
3.3. Vorteile und Potenziale .....	14
3.3.1. Ökologische Vorteile .....	16
3.3.2. Ökonomische Vorteile .....	20
3.3.3. Soziale Vorteile .....	21
3.4. Hemmnisse .....	22
4. Umweltkosten - Grundlagen .....	27
4.1. Stand der Technik .....	29
4.1.1. Internalisierung .....	29
4.1.2. Anwendung der Umweltkostenrechnung .....	33
4.2. Stand der Forschung .....	34
5. Vergleichende Kostenanalysen .....	37
5.1. Annahmen und Systemgrenzen .....	37
5.2. Beschreibung des Praxisprojekts .....	40
5.3. Berechnung der Umweltkosten .....	43
6. Ergebnisse .....	46
6.1. Lebenszykluskosten .....	46
6.2. Umweltkosten .....	48
7. Zusammenfassung und Ausblick .....	59
7.1. Zusammenfassung der Ergebnisse .....	59
7.2. Diskussion .....	60
7.3. Ausblick .....	63
8. Literaturverzeichnis .....	66
9. Abbildungsverzeichnis .....	73
10. Tabellenverzeichnis .....	75
Anhang A .....	76
Anhang B .....	79

# Abkürzungsverzeichnis

AP - Versauerungspotenzial, engl. acidification potential .....	9
BEHG - Deutsches Brennstoffemissionshandelsgesetz .....	3
BGF - Bruttogrundfläche gem. DIN 277 .....	43
BKI - Baukosteninformationszentrum .....	7
BNB - Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen.....	37
EC - Umweltkosten, engl. environmental costs .....	50
EnEV - Energieeinsparverordnung.....	1
EoL - Ende-des-Lebensweg-Stadium, engl. End-of-Life.....	2
EP - Eutrophierungspotenzial, engl. eutrophication potential.....	9
EU-ETS - Emissionshandelssystem der Europäischen Union .....	3
GEG - Gebäudeenergiegesetz.....	1
GWP - Globales Treibhauspotenzial, engl. global warming potential.....	8
LCA - Ökobilanz, engl. Life Cycle Assessment.....	8
LCC - Lebenszykluskostenanalyse bzw. Lebenszykluskosten, engl. Life Cycle Costing .....	7
Nawaros - nachwachsende Rohstoffe .....	21
NRF - Nettorraumfläche gem. DIN 277 .....	43
NUF - Nutzfläche gem. DIN 277.....	43
ODP - Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht, engl. ozone depletion potential .....	8
POPC - Potenzial zur Bildung für troposphärisches Ozon, engl. photochemical creation potential.....	9

# Glossar

## **Diskontierung**

„Prozess der Berechnung des gegenwärtigen Werts zukünftiger monetärer Werte“  
(Deutsches Institut für Normung e. V [DIN], 2021)

## **Diskontierungsfaktor**

„Faktor, der auf zukünftige monetäre Beträge angewendet wird, um ihren gegenwärtigen Wert zu berechnen“ (DIN, 2021)

## **Graue Emissionen**

Bezeichnen – analog zu grauer Energie – Emissionen, welche während vor- und nachgelagerten Prozessen eines Produkts entstehen. Diese umfassen die Herstellung und Entsorgung inkl. Transport, Lagerung und notwendige Hilfsmittel. Graue Emissionen können auch als „materialgebundene“ oder „produktinhärente“ Emissionen bezeichnet werden. (EnergieSchweiz, 2017, S. 5)

## **Internalisierung**

Die Internalisierung bezeichnet im Rahmen der Umweltpolitik die Zuweisung von bisher unbeglichenen Umweltkosten nach dem Verursacherprinzip (Umweltbundesamt, 2021a), z.B. die CO<sub>2</sub>-Steuer i. S. d. deutschen Brennstoffemissionshandelsgesetz internalisiert Kosten für den Ausstoß von Treibhausgasen in bestimmten Sektoren



# 1. Einführung

Im Jahr 2020 bilden extreme Wetterverhältnisse, Naturkatastrophen, Biodiversitätsverlust, anthropogen verursachte Umweltkatastrophen sowie das Scheitern der Klimaschutzmaßnahmen die fünf wahrscheinlichsten globalen Katastrophen (World Economic Forum, 2020, Figure I). Dass menschliches Handeln Ursache der Klimaerwärmung ist und dass die Entwicklungen lediglich durch die radikale Reduktion der anthropogenen Treibhausgasemissionen auf Netto-Null begrenzt werden können, bestätigt der aktuellste Sachstandsbericht des Weltklimarates (Weltklimarat [IPCC], 2021).

Dem Bau- und Gebäudesektor kommt dabei eine besondere Verantwortung zu, da dieser global rund 38 % der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugt und damit ein signifikantes Potential zur Reduktion aufweist. Wie Abbildung 1 darstellt, entfallen 28 % der Emissionen auf die Nutzung von Gebäuden. Zusätzlich sind dem Bausektor aufgrund der Herstellung von Baustoffen rund 10 % der globalen Emissionen zuzuschreiben. Diese werden hauptsächlich durch energie- und damit emissionsintensive Materialproduktionen wie Glas, Zement und Stahl verursacht. (United Nations Environment Programme, 2020, S. 4)

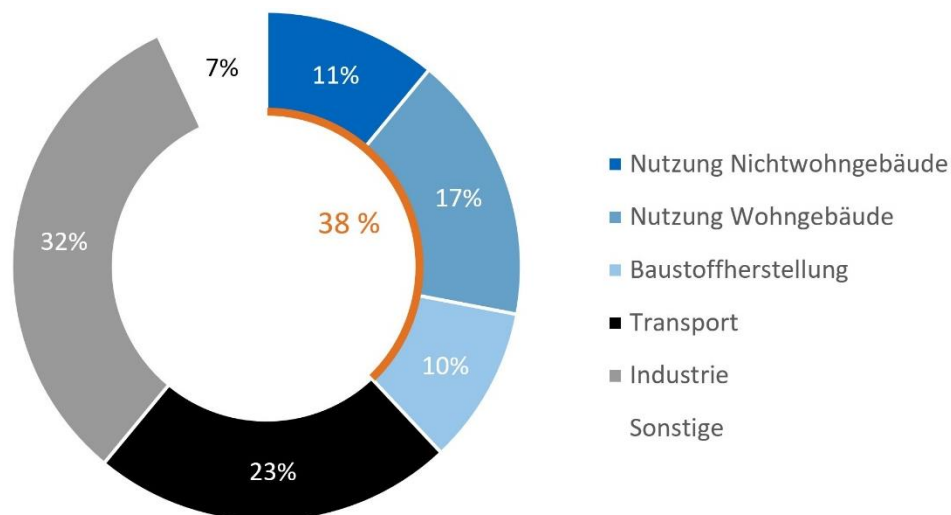


Abbildung 1: Globale energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen 2019 nach eigener Darstellung gemäß (United Nations Environment Programme, 2020, S. 4)

Die Klimaneutralität Europas hängt somit maßgeblich von den Entwicklungen des Bau- und Gebäudesektors ab. Um den Energiebedarf während der Nutzungsphase der Gebäude zu senken, bestehen in Deutschland bereits Richtlinien und Gesetze wie die frühere Energieeinsparverordnung (EnEV) und das aktuell geltende Gebäudeenergiegesetz (GEG). Abbildung 2 verdeutlicht, dass die gesetzlichen Anforderungen eine

deutliche Reduktion des Primärenergiebedarfs für den Gebäudebetrieb und folglich der einschlägigen Treibhausgasemissionen zur Folge haben. Darüber hinaus ist es seit mehreren Jahren möglich Gebäude zu errichten, welche mehr erneuerbare Energie erzeugen als für den effizienten Betrieb benötigt wird (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2019, S. 29).

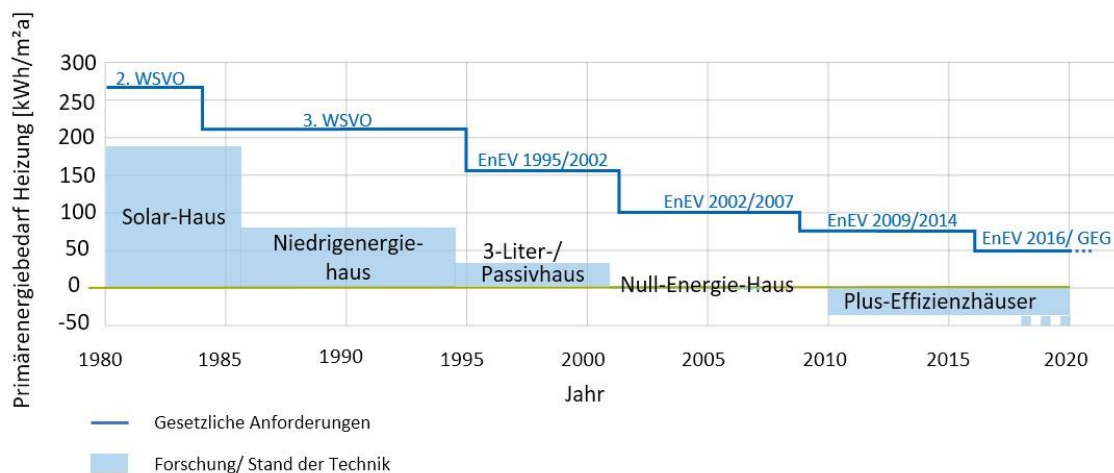


Abbildung 2: Entwicklung des gesetzlich geforderten und technisch realisierbaren Heiz-Primärenergiebedarfs nach eigener Darstellung gemäß (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung & Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2018, S. 5)

Durch den stark reduzierbaren Energiebedarf während der Nutzung und zunehmende Versorgung mit erneuerbaren Energien, rücken die Umweltwirkungen der Herstellungs- und der End-of-Life-Phase (EoL) in den Fokus. Abbildung 3 veranschaulicht, wie sich der Anteil der CO<sub>2</sub>-äquivalenten Treibhausgasemissionen der Gebäudenutzung im Vergleich zu den materialgebundenen Emissionen entwickelt. Gebäude, die in Summe über ein Kalenderjahr durch gebäudenah produzierte CO<sub>2</sub>-neutrale Energie genauso viele Treibhausgasemissionen vermeiden wie durch die Nutzung ausgestoßen werden, können als „klimaneutrale Gebäude“ bezeichnet werden (Braune et al., 2020, S. 8–9). In diesem Sinne kann auch die Kategorie „Null-Energie“ in Abbildung 3 verstanden werden. Durch einen optimierten Energieverbrauch im Gebäudebetrieb steigt der prozentuale Anteil der grauen Emissionen<sup>1</sup> an, während die Gesamtemissionen moderat sinken. Bei einem „Null-Energie“- oder „klimaneutralen Gebäude“ liegt der Anteil der grauen Emissionen demnach bei 100 %. Dabei ist zu beachten, dass die grauen Emissionen für energieeffizient betriebene Gebäude höher ausfallen können als für Gebäude

<sup>1</sup> siehe Glossar



mit niedrigerem Energiestandard. Dies begründet sich oftmals in den höheren Materialaufwendungen für Dämmschichten oder technische Systeme wie Solar- und Photovoltaikanlagen.

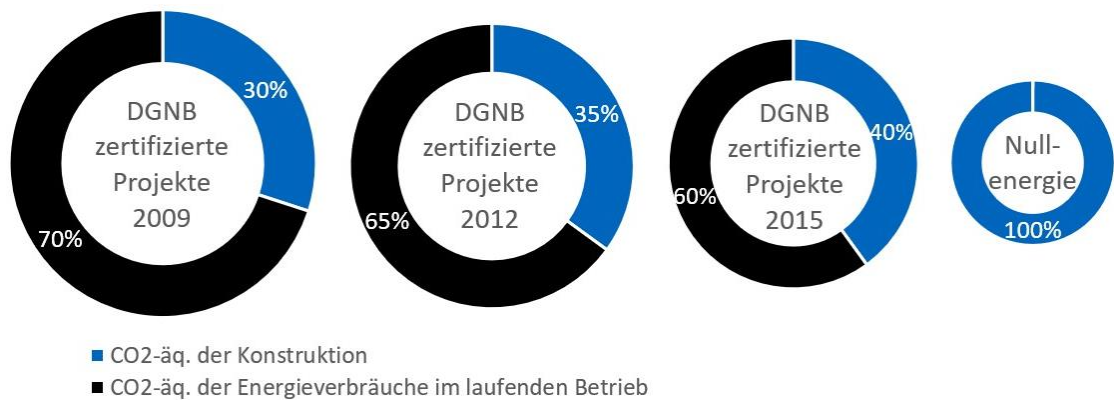


Abbildung 3: Entwicklung der Treibhausgasemissionen für Konstruktion und Energieverbrauch im Betrieb DGNB-zertifizierter Gebäude nach eigener Darstellung gemäß (Braune et al., 2018, S. 13)

Die Errichtung umweltverträglicher Gebäude bedeutet aufgrund notwendiger Zusatzmaßnahmen wie Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energie, Beratungs- und Zertifizierungsdienste oder die Wahl umweltverträglicher, regionaler Baustoffe oftmals höhere Erstinvestitionskosten.

In der gesamten deutschen Wirtschaft sind Mehrinvestitionen von bis zu 2,3 Billionen Euro erforderlich, um bis 2050 zumindest 95 % der Klimaneutralitätsziele zu erreichen (Gerbert et al., 2018, S. 7). Unterlassener Klimaschutz verursacht jedoch ebenfalls Kosten für die Gesellschaft, um entstehende Schäden an Mensch und Umwelt soweit wie möglich zu kompensieren (Umweltbundesamt, 2021a).

Seitens der Politik werden als Investitionsanreiz neben Subventionen auch Instrumente wie die EU-Taxonomie, das EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS) oder das nationale Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) eingesetzt. Mittels EU-ETS und BEHG werden die CO<sub>2</sub>-äquivalenten Treibhausgasemissionen ausgewählter emissionsintensiver Industrien bepreist, da diese besonders hohe Umweltschäden verursachen. Dies betrifft die Bau- und Immobilienbranche aktuell vor allem im Bereich der Wärmeerzeugung mittels fossiler Energieträger, aber auch die energieintensive Herstellung bestimmter Baumaterialien wird durch das EU-ETS erfasst. (BMW, 2020)

Durch die Internalisierung sollen derartige Schadenskosten, welche derzeit von Umwelt und Gesellschaft getragen werden müssen, zunehmend den Verursachern zugeschrieben werden. Das Umweltbundesamt weist klar darauf hin, dass ohne eine

Internalisierung der Umweltkosten eine Wettbewerbsverzerrung zulasten umweltverträglicher Produkte und Entwicklungen sowie zulasten der Allgemeinheit herrscht. Mittels der aktuell geltenden Instrumente wird dies nur unzureichend umgesetzt. (Umweltbundesamt, 2021a)

Um darstellen zu können, wie diese Wettbewerbsbereinigung die Wirtschaftlichkeit von Holzbauten beeinflussen kann, widmet sich diese Arbeit der Lebenszyklus- und Umweltkostenanalyse von Gebäuden.

## 2. Forschungsgegenstand und Methodik

Ziel der Masterthesis ist es, die Lebenszyklus- sowie Umweltkosten zweier verschiedener Konstruktionsvarianten eines Gebäudes zu quantifizieren und zu vergleichen. Dadurch sollen Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie hoch der Anteil an Kosten ist, die ein Hochbauprojekt über dessen Lebenszyklus zulasten der Allgemeinheit verursacht. Der Fokus der Untersuchungen liegt dabei auf den konstruktions- bzw. baustoffinhärenten Umweltkosten, denn es gilt die folgenden Forschungsfragen zu klären:

1. *Weist ein Gebäude in Holzmodulbauweise geringere Lebenszyklus- und Umweltkosten auf als ein Gebäude in konventioneller Massivbauweise aus mineralischen Baustoffen?*
2. *Generieren aktuelle Umweltkostensätze durch die Internalisierung einen wirtschaftlichen Vorteil für die Holzmodulbauweise?*

Als Analyseobjekt stellt das Holzmodulbauunternehmen LiWood AG Plan- und Kostendaten des Schulneubaus „Montessori Schule“ zur Verfügung. Die Schule wird einerseits in ihrer originalen Bauweise aus Brettsperrholz-Modulen bilanziert. Dem gegenübergestellt werden die Lebenszyklus- und Umweltkosten eines fiktiven Zwillings in konventioneller Massivbauweise aus mineralischen Baustoffen. Für beide Varianten werden eine identische Gebäudegeometrie, gleiche technische Anlagen und Versorgungssysteme sowie Energiestandards angenommen.

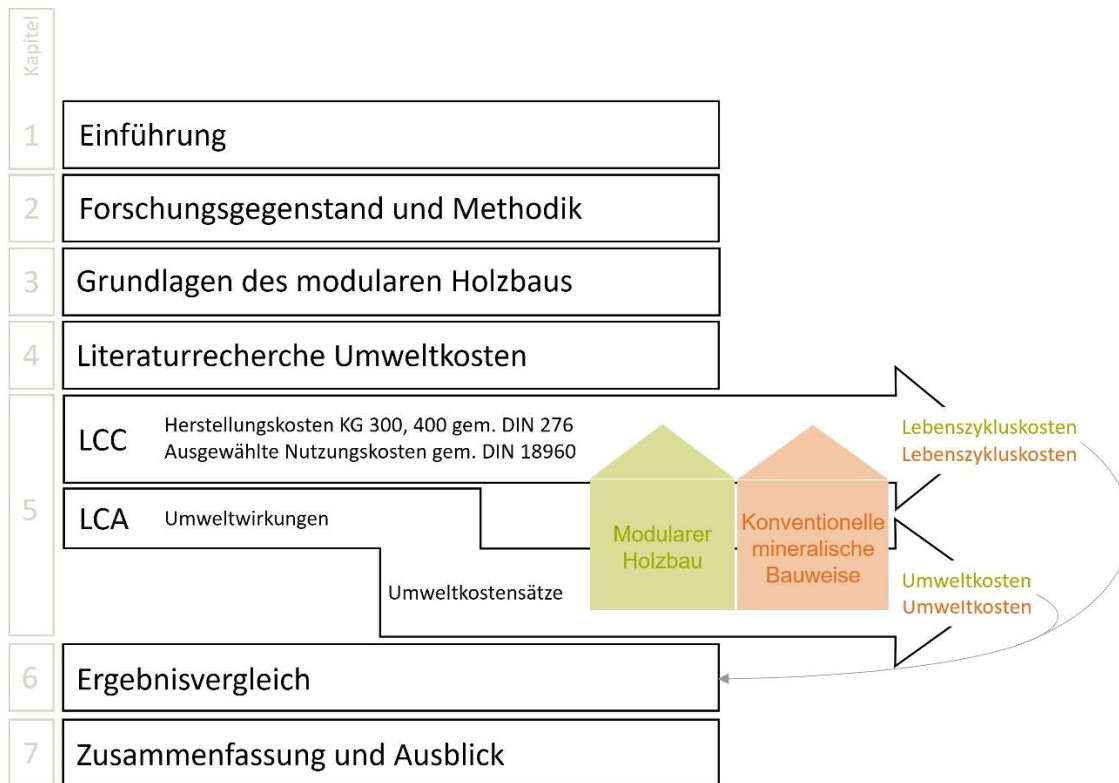
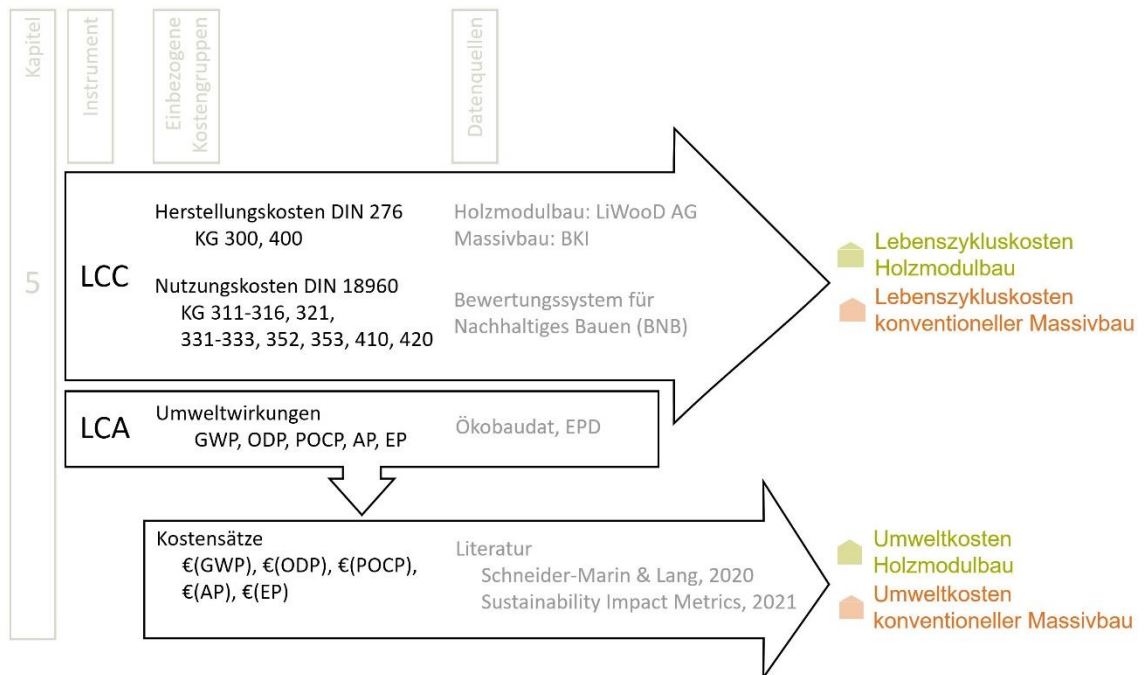


Abbildung 4: Methodisches Vorgehen im Rahmen der Masterthesis nach eigener Darstellung

Abbildung 4 visualisiert das schrittweise Vorgehen zur Beantwortung der gestellten Forschungsfragen. Nach dem einführenden **Kapitel 1** und den Erläuterungen zu Forschungsgegenstand & Methodik unter **Kapitel 2** befasst sich **Kapitel 3** mit den Grundlagen des modularen Holzbaus. Unter anderem wird verdeutlicht, weshalb Holzmodulbau als umweltverträgliche Bauweise eingestuft werden kann und welche Hemmnisse dem Einsatz gegenüberstehen. Diese Grundlagen dienen dem Verständnis der Bauweise und deren Unterschied zu üblichen Konstruktionen aus mineralischen Baustoffen. **Kapitel 4** definiert den Begriff „Umweltkosten“ und stellt den Stand der Technik sowie Forschung dar. **Kapitel 5** dokumentiert unter dem Grundsatz der Transparenz alle Rahmenbedingungen und Annahmen der durchgeführten Lebenszykluskostenanalyse sowie Ökobilanzierung und Umweltkostenberechnung für die beiden Varianten des Projekts „Montessori Schule“. Die zugehörigen Ergebnisse werden in **Kapitel 6** grafisch ausgewertet und die beiden Konstruktionsvarianten „Holzmodulbau“ und „Stahlbeton“ miteinander verglichen. Eine abschließende Zusammenfassung der Erkenntnisse, deren kritische Beleuchtung und ein Ausblick auf noch offene Forschungsfragen sind in **Kapitel 7** verortet.



**Abbildung 5: Systematik, einbezogene Kostengruppen und Datenquellen zur Erstellung der Lebenszyklus- und Umweltkostenanalysen im Rahmen der Masterthesis nach eigener Darstellung**

Abbildung 5 stellt detaillierter dar, welche Daten und Datenquellen zu den Berechnungen in Kapitel 5 herangezogen werden. Die Lebenszykluskostenanalyse (engl. Life Cycle Costing - LCC) des Praxisprojekts beinhaltet im Rahmen dieser Arbeit die Bauwerkskosten sowie ausgewählte Kosten des Objektbetriebs über 50 Jahre. Welche Kostengruppen einbezogen werden, wurde analog zum Bewertungssystem für Nachhaltiges Bauen (BNB) für Unterrichtsgebäude gewählt. Dieses fordert neben den Kostengruppen 300 und 400 gemäß DIN 276 die Berücksichtigung der Nutzungskostengruppen 311-316, 321, 331-333, 352, 353, 410 und 420 gemäß DIN 18960. Die Herstellungskosten für das Originalprojekt in Holzmodulbauweise stellt die LiWood AG zur Verfügung. Die Höhe der Herstellungskosten eines Schulbaus in identischer Größe aus konventionell mineralischer Konstruktion wird mittels des Kostenplaners 2021 des Baukosteninformationszentrums (BKI) kalkuliert. Dieser bietet Referenzwerte für Baukosten von Förder- und Sonderschulbauten je Quadratmeter Bruttogrundfläche, womit das Zielkonzept der inklusiven „Montessori Schule“ mit Ganztagesbetreuung und Kinderhort abgebildet werden kann. Die BKI-Daten spiegeln Durchschnittskosten verschiedener aktueller Bauprojekte der Nutzungsform wider. Dabei ist lediglich eines der einbezogenen Referenzprojekte in Holzbauweise gefertigt und ein signifikant hoher Anteil aus Stahlbeton. Aus diesem Grund eignet sich diese Quelle zur Abschätzung der

Herstellungskosten eines Zwillingsgebäudes mit gleicher Bruttogrundfläche wie das Originalobjekt „Montessori Schule“.

Abbildung 6 fasst zusammen, welche Lebenszyklusphasen des Gebäudes in der LCC berücksichtigt werden.

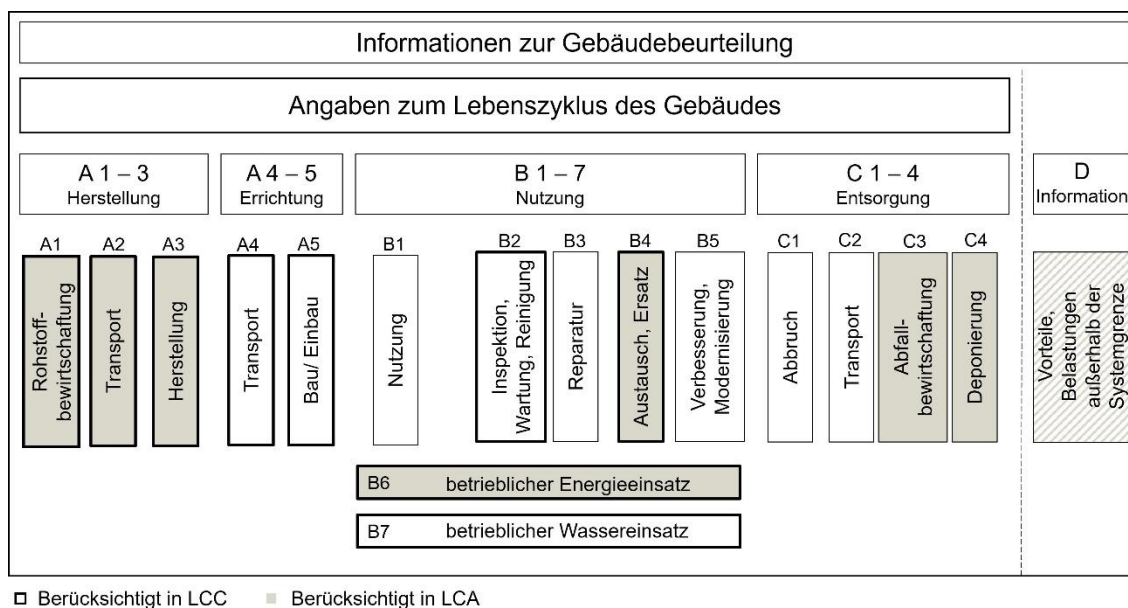


Abbildung 6: Im Rahmen der LCA und LCC berücksichtigte Lebenszyklusphasen nach eigener Darstellung gemäß DIN EN 15978 (DIN, S. 21)

Um die Umweltkosten abschätzen zu können, werden zunächst die Umweltwirkungen der beiden Konstruktionsvarianten „Holzmodulbau“ und „konventioneller Massivbau“ mittels einer Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment - LCA) berechnet. Die Bilanzierung erfolgt gemäß DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044 sowie DIN EN 15978 und nutzt die Datenbank ÖKOBAUDAT (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat & Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung [BBSR], 2021) als Grundlage. Die einbezogenen Lebenszyklusphasen sind ebenfalls Abbildung 6 zu entnehmen. Es werden Umweltparameter in den Wirkungskategorien

- Globales Treibhauspotenzial (GWP) [ $kg CO_2 - \ddot{A}q.$ ]
- Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP) [ $kg R11 - \ddot{A}q.$ ]
- Potenzial zur Bildung für troposphärisches Ozon (POCP) [ $kg C_2H_4 - \ddot{A}q.$ ]
- Versauerungspotenzial (AP) [ $kg SO_2 - \ddot{A}q.$ ]
- Eutrophierungspotenzial (EP) [ $kg PO_4^{3-} - \ddot{A}q.$ ]

kalkuliert. Diese sog. Mid-Point-Indikatoren nach DIN EN 15804 aus 2014 werden mit möglichst aktuellen Umweltkostensätzen gewichtet.

Einerseits dient eine Studie von Schneider-Marin und Lang als Datenquelle für maximale Kostensätze (Schneider-Marin & Lang, 2020). Andererseits werden vergleichend die Umweltkosten der Website ‚www.ecocostsvalue.com‘ der Technischen Universität Delft herangezogen, welche auf dem Vermeidungskostenansatz basieren und daher ein Minimum an Umweltkosten abbilden. Abbildung 7 zeigt die Methodik zur Berechnung von Umweltkosten auf Basis von Mid-Point-Indikatoren.

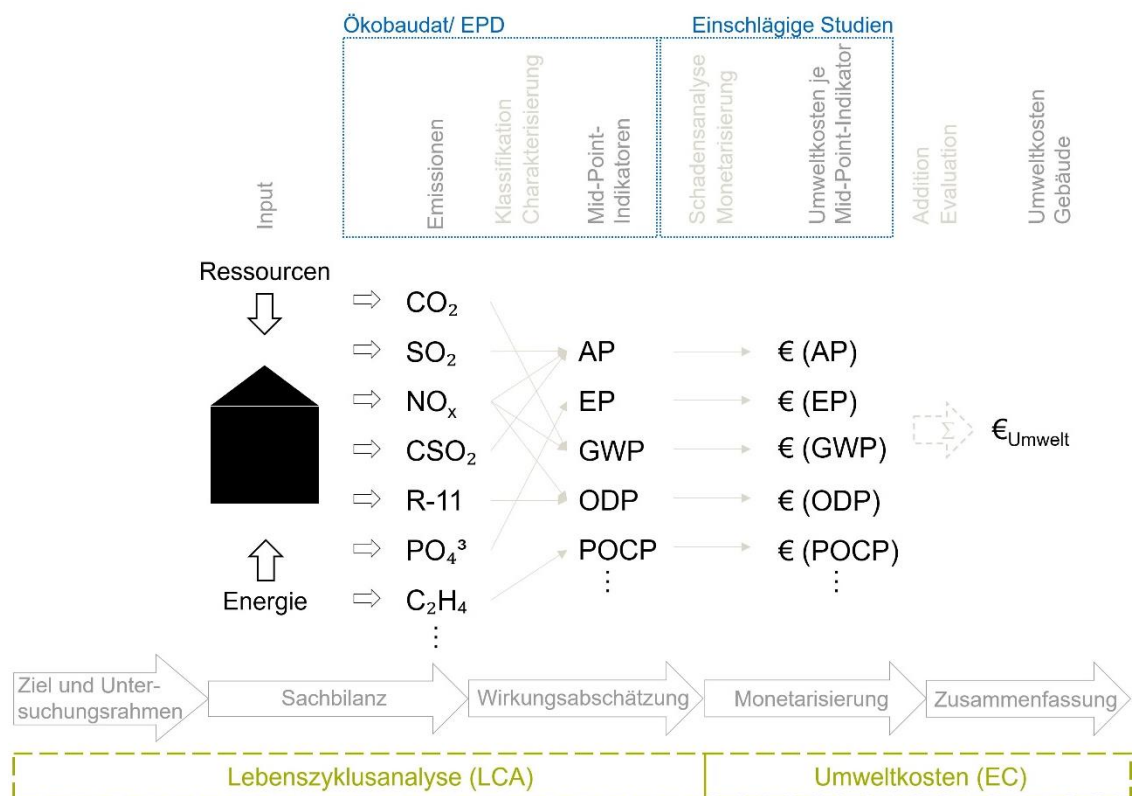


Abbildung 7: Methodik zur Umweltkostenberechnung im Gebäudesektor durch die Gewichtung von Mid-Point-Indikatoren einer Ökobilanz nach eigener Darstellung gemäß (Schneider-Marin & Lang, 2020, S. 1639)

Mit diesem Vorgehen soll ermittelt werden, wie hoch die Kosten sind, welche die Allgemeinheit durch Herstellung, Betrieb und Entsorgung eines Gebäudes zu tragen hat. Der Vergleich der Konstruktionen „Holzmodulbau“ und „konventioneller Massivbau“ soll Aufschluss darüber geben, ob modulare Holzbauweise im Sinne einer umweltverträglichen Bauweise einen makroökonomischen Vorteil gegenüber konventionellen mineralischen Bauweisen bieten kann. Darüber hinaus wird kalkuliert, wie hoch die Umweltkostensätze sein müssten, damit der analysierte Schulneubau in modularer Holzbauweise mit internalisierten Umweltkosten ebenso hohe oder geringere Gesamtkosten aufweist als konventioneller Massivbau im mittleren Preissegment.

## 3. Modularer Holzbau - Grundlagen

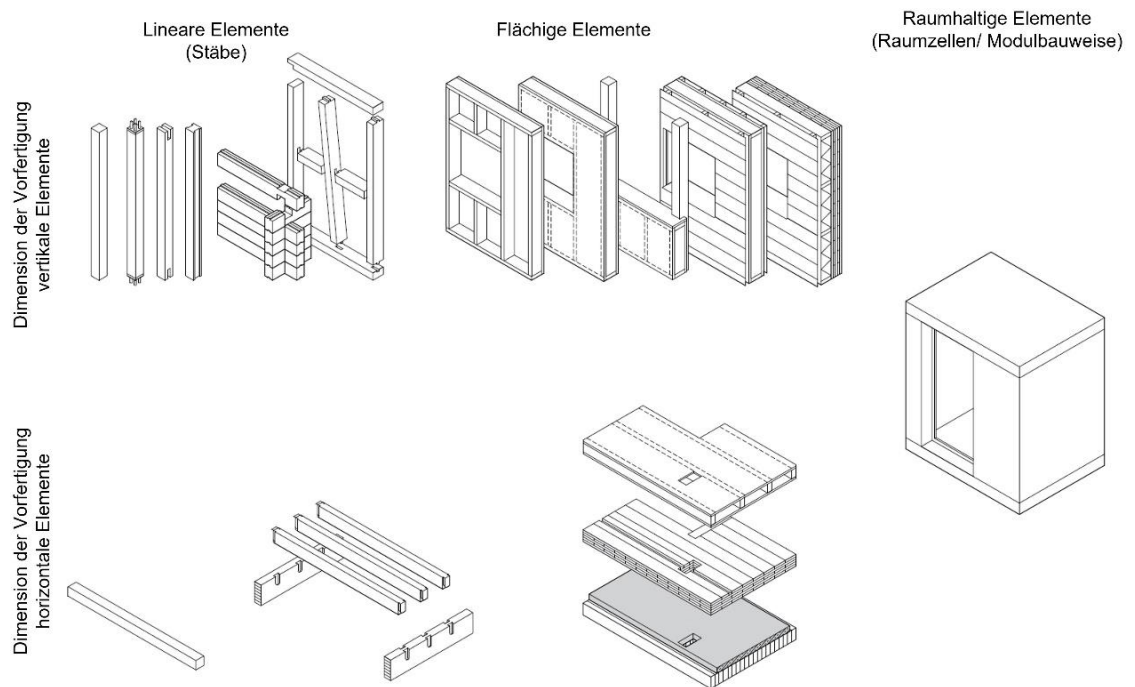
Der Holzmodulbau ist eine Bauweise, welche vielerlei Vorteile hinsichtlich Ökologie, Ökonomie und sozialen Belangen bieten kann. Dennoch bestehen verschiedene Hemmnisse, die dem Einsatz entgegenstehen. Nachfolgend wird definiert, was unter „modularem Holzbau“ zu verstehen ist und welche Vorzüge und Einschränkungen mit dieser Bauweise einhergehen. Neben Erfahrungswerten aus der Baupraxis zeigen auch einschlägige Studien, wie von Brakus oder BMUB, dass es im Bereich des (modularen) Holzbaus häufig an Fachwissen mangelt. (Brakus, 2015, S. 53; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [BMUB], 2015, S. 112). Die nachstehenden Erläuterungen dienen somit dem Verständnis des zentralen Analyseobjekts dieser Arbeit – der „Montessori Schule“ in Holzmodulbauweise – und dessen Abgrenzung gegenüber konventionellen mineralischen Massivbauten wie Stahlbeton.

### 3.1. Definition Modulbau

Da das Praxisprojekt „Montessori Schule“ in sog. Holzmodulbauweise errichtet ist, soll dieser Begriff vorab für den Rahmen der Arbeit definiert werden. Anschließend werden einige bautechnische Eigenschaften zusammengefasst, welche der betrachteten Bauweise inhärent sind.

Im Allgemeinen können Bauteile verschiedener Dimensionen in einer externen Produktionsstätte vorgefertigt, zur Baustelle transportiert und in situ montiert werden. Kaufmann et al. unterscheiden hierbei die in Abbildung 8 dargestellte Vorfertigung linearer, flächiger und raumhaltiger Elemente (Kaufmann et al., 2017).





**Abbildung 8: Dimensionen vorgefertigter Elemente im Bauwesen nach (Kaufmann et al., 2017, S. 143)**

In der Baupraxis existiert eine Vielzahl an Begrifflichkeiten, welche im Zusammenhang mit vorgefertigtem Bauen verwendet werden. Speziell in Bezug auf raumhaltige Elemente sorgen Ausdrücke wie „Raumsystem-“, „Raumzellen-“, „Modul-“ oder „Containerbauweise“ oftmals für Missverständnisse. (Geier, 2018, S. 22; Jösch, 2019, S. 8; Winter et al., 2019, S. 11)

Die Bezeichnung „modulares Bauen“ oder „Modulbauweise“ kann teilweise missverständlich sein, da sich das Wort „Modul“ vom lateinischen „modulus“ ableitet, was übersetzt „das Maß“ bedeutet (Knaack et al., 2012, S. 7). Demnach kann jegliches „Element, das auf Grundlage eines Ordnungsprinzips in einem System positioniert wird, z.B. Stützen, Wandtafeln, Raumzellen“ (Staub et al., 2008, S. 8) als Modul bezeichnet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird dennoch entsprechend Abbildung 8 von Modulbauweise gesprochen, wenn vorgefertigte, raumhaltige Elemente zur Baustelle geliefert und dort montiert werden. Der Vorfertigungsgrad solcher Module kann 60 bis 100% betragen, wenn Teile der Haustechnik sowie des Ausbaus integriert sind (Staub et al., 2008, S. 40).

Des Weiteren wird in dieser Thesis das modulare Bauen von seriell gebauten Typenhäusern abgegrenzt. Serielle Gebäude, auch Typenhäuser genannt, basieren auf einer einmalig durchgeführten Planung und mehrmaliger, identischer Bauausführung an verschiedenen Orten. Modulbau muss demnach nicht seriell sein, da auch ein

Modulgebäude individuell und projektspezifisch geplant sein kann. (Grimm, 2019; RM Handelsmedien GmbH & Co. KG, 2019)

Das Analyseobjekt „Montessori Schule“ wurde ebenfalls individuell, den Wünschen der Bauherrenschaft entsprechend und modular geplant.

Als Konstruktionsmaterial wird im Modulbau häufig Stahl, Beton oder Holz eingesetzt (Staib et al., 2008, S. 50–53). Das in dieser Arbeit betrachtete Modulbauprojekt besteht aus massiven Brettsperrholzdecken, -wänden und -böden.

Brettsperrholz (engl. Cross Laminated Timber – CLT oder X-Lam) kann einerseits zu großflächig raumbildenden und tragenden Elementen verarbeitet werden und bietet hohe Formstabilität durch geringes Schwind- und Quellverhalten. Andererseits lassen sich durch zweiachsige Lastabtragung geringe Bauteilhöhen realisieren. (Mestek et al., 2016, S. 5)

Dies ist im Modulbau von besonderer Wichtigkeit, da durch die vertikale Stapelung von Raumzellen doppelte Geschossdeckenkonstruktionen entstehen. Die weiteren Vorteile des Werkstoffes sowie der modularen Bauweise werden in Abschnitt 3.3 erörtert.

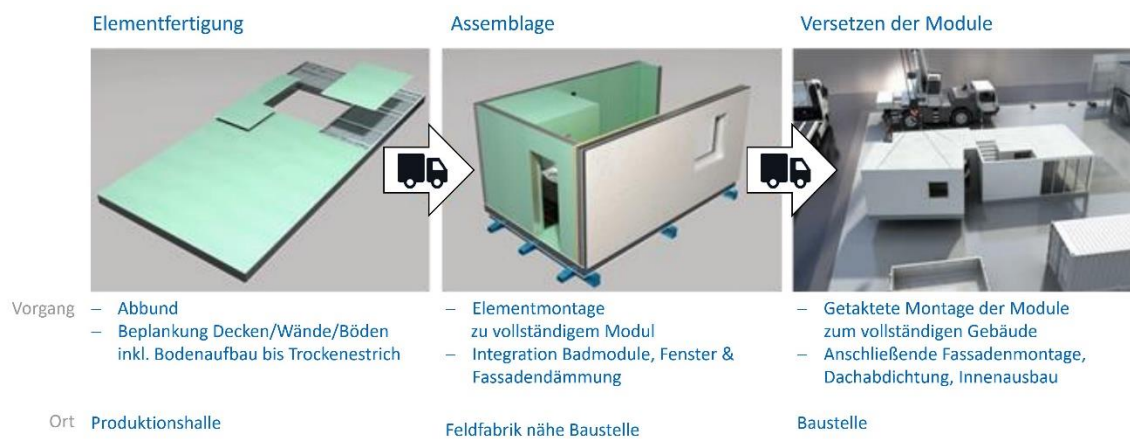
## 3.2. Holzmodulbau der LiWood AG

Das mittelständische Holzmodulbauunternehmen LiWood AG agiert als Kooperationspartner für die vorliegende Arbeit und stellt Kosten- sowie Plandaten des Analyseobjekts „Montessori Schule“ zur Verfügung. Aus diesem Grund werden die Vorgänge im modularen Holzbau anhand des LiWood-Systems zusammengefasst.

Wie oben bereits erwähnt, können Modulbauten nicht nur seriell, sondern auch individuell geplant werden, wie auch die „Montessori Schule“. In diesem Fall übernimmt die LiWood AG in einer möglichst frühen Planungsphase als Generalplaner die Anpassung des vom Auftraggeber gewünschten Grundrisses auf die im Rahmen des LiWood-Systems mögliche Gestaltung. Dabei bestehen neben den üblichen bauordnungsrechtlichen und bautechnischen Bedingungen, wie Statik, Brandschutz, Bauphysik usw. nur wenige Zwangspunkte. Einer der maßgebendsten ist die geschossübergreifend übereinander liegende Anordnung der modularen Sanitärzellen, welche zeitgleich als Technik Einheit fungieren können und die Elektro- und Heizungsverteilung sowie sonstige Technikanschlüsse beinhalten. Des Weiteren wird ein Achsraster für die Modulproduktion festgelegt. Für die Gestaltung bedeutet dies, Fenster nicht an den Modulstößen zu verorten, da diese bereits in der Vorfertigung in die Modulwand integriert werden. Das

Achsrastrer, sprich die projektspezifische Standardbreite eines Moduls, beträgt in der Regel etwa 2,50 Meter. Bei diesem Breitenmaß ist die maximale Transportbreite, welche ohne Sondergenehmigung zulässig ist, optimal ausgenutzt. Die Modullänge bestimmt sich nach der Gebäudetiefe und der üblicherweise maximalen Transportlänge von 12 Metern. Ansonsten ermöglicht das LiWood-System individuelle Grundrisse, sodass in der späteren Produktion verschiedenste Modulkonstruktionen entstehen.

Nach einer vollständig abgeschlossenen Planung und 3D-Modellierung des Gebäudes startet die Bauphase, welche sich entsprechend Abbildung 9 in drei Abschnitte gliedern lässt.



**Abbildung 9: Vorgänge der Bauausführung im LiWood-Holzmodulbau nach eigener Darstellung in Anlehnung an (Forum-Holzbau, 2017, S. 4)**

Zunächst werden die Brettsperrholzelemente abgebunden und in der Vorproduktion gemäß brandschutztechnischem Erfordernis mit Gipskarton- oder Gipsfaserplatten beplankt. Die Modulböden erhalten im Schritt der Elementfertigung bereits den Bodenaufbau inklusive schallschutztechnisch erforderlicher mineralischer Schüttung in einem Wabensystem, Trittschalldämmung, Elektrik und Heizrohre sowie Trockenestrich. Lediglich die Nutzschicht wird abschließend in der Innenausbauphase verbaut. Die vorgefertigten Elemente werden mittels LKW zu einer sog. LiWood-Feldfabrik geliefert. Als Feldfabrik wird eine mobile, reversible Halle in Holzbauweise bezeichnet, welche LiWood im Vorfeld eines Bauprojekts temporär in der Nähe der Baustelle und verkehrstechnisch günstig gelegen errichtet. In diese beheizbare Halle werden die Boden-, Wand- und Deckenelemente „just in time“ angeliefert und von einem Handwerkerteam witterungsunabhängig zu fertigen Modulen zusammengefügt. Im Schritt der sog. Assemblage (franz.: das Zusammensetzen/ -fügen) erhalten die Modulaußenwände Fenster und Mineralwolle-Dämmung inkl. Fassadenbahn. Bis zu sieben vollständige Module

von 20 bis 25 m<sup>2</sup> Größe können die Feldfabrik täglich verlassen. Somit beträgt die Assemblage-Zeit für ein Modul je nach Komplexitätsgrad 70 bis 90 Minuten. Der Transportweg zwischen Feldfabrik und Baustelle ist möglichst geringgehalten, um Lieferzeiten, Kosten und Umweltwirkungen zu minimieren. Die Entfernung bestimmt sich durch die Möglichkeit ein ausreichend großes, unbebautes Grundstück für den temporären Aufbau der Feldfabrik anzumieten. Auf der Baustelle werden die Module mittels Mobilkran vom Sattelschlepper an die vorgesehene Position gehoben und dort mit den ggf. schon vorhandenen Modulen verbunden. Während dieses Vorgangs werden auch die Versorgungsleitungen der einzelnen Module verknüpft.

Durch die stark getakteten Prozesse und die detaillierte vorgelagerte Planung können pro Tag rund 150 m<sup>2</sup> Raum gebaut werden.

### 3.3. Vorteile und Potenziale

Wie in Kapitel 1 erläutert, steht die Gesellschaft in Bezug auf den Klima- und Umweltschutz vor einem zwingenden Wendepunkt. Eine Herausforderung liegt darin, die Wettbewerbsfähigkeit umweltfreundlicher Investitionen herzustellen, ohne Wirtschaftlichkeit und soziale Belange zu gefährden. Per Definition verlangt nachhaltiges Handeln nach dem Gleichgewicht von Ökologie, Ökonomie und Sozialem. Im Folgenden sollen einige Vorteile und Potenziale untersucht werden, die der Holzmodulbau im Sinne einer nachhaltigen Bauweise zu bieten hat. Tabelle 1 fasst eine Auswahl von Vorteilen knapp zusammen und gliedert diese nach den drei Säulen der Nachhaltigkeit sowie nach bautechnischen Stärken. Die Grenzen dieser Gliederung verlaufen jedoch häufig fließend, sodass einige Merkmale Stärken in verschiedenen Bereichen aufweisen. Im Anschluss werden die Vorzüge detaillierter erläutert.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Vorteile der Holzmodulbauweise aus Brettsperrholz nach eigener Darstellung mit Daten nach (Mestek et al., 2016, S. 5)

Ökologie	Langfristige CO <sub>2</sub> -Bindung durch materielle Verwendung von Massivholz aus nachhaltiger Forstwirtschaft
	Sehr gute Recyclingfähigkeit durch Wiederverwendung der großflächigen Brettsperrholz-Bauteile und Kaskadennutzung mit abschließender thermischer Verwertung zur Substitution fossiler Brennstoffe
	Ökologischer Mehrwert des Ökosystems Wald (Biodiversität, Luft- und Wasserreinhaltung)
Ökonomie	Guter Wärmeschutz durch geringe Wärmeleitfähigkeit von Nadelhölzern
	Kostensicherheit für Bauherrenschaft durch Pauschalverträge und Vermeidung ausführungsbegleitender Planung
	Sehr kurze Bauzeit durch hohen Vorfertigungsgrad führt zu früherer Vermietung und dadurch Amortisation der Baukosten
	Förderungen für nachwachsende Rohstoffe nutzbar
	Konstant hohe Qualität durch Produktion in witterungsunabhängiger Umgebung (Reduktion unvorhergesehener Baustopps möglich)
	Geringes Gewicht gegenüber mineralischen Massivbauten (positiv für Transport und Aufstockungen auf Bestandsbauten)
Soziales	Reduzierter Bedarf an Lagerflächen und Baustelleneinrichtung in situ durch just-in-time-Lieferungen (v.a. in innerstädtischen Lagen positiv)
	Geringere Lärmbelastung von Anwohnern im Baustellenumfeld durch kurze Bauzeiten und leiser Baustellenprozesse
	Witterungsunabhängiger, beheizter Arbeitsplatz für Handwerker in der Elementfertigung und Assemblage
	Freizeit- und Erholungswert des Ökosystems Wald (nachhaltige Bewirtschaftung wird vorausgesetzt)
	Hoher Wohnkomfort durch sehr gute Feuchte- und Wärmespeicherfähigkeit
	Nutzerfreundlichkeit durch uneingeschränkte Möglichkeit zur Lastbefestigung
Technik	Zeitnahe Nutzbarkeit des gebauten Raums durch sehr kurze Bauzeiten
	Hohe Formstabilität durch geringes Schwind- und Quellverhalten
	Geringere Bauteilhöhen durch zweiachsige Lastabtragung
	Verbesserter Wärme-, Feuchte-, Brand-, Schallschutz durch flächigen Schichtaufbau ohne Luftströme in der Bauteilebene (im Vergleich zu Holztafelbau)

### 3.3.1. Ökologische Vorteile

Ein wesentlicher Vorteil des Baustoffes Holz ist, dass während des Wachstums je Kubikmeter bis zu einer Tonne atmosphärisches CO<sub>2</sub> in Form von biogenem Kohlenstoff eingelagert wird. Durch die stoffliche Verwendung als Baumaterial bleibt dieser Kohlenstoff langfristig gebunden, da er erst am Ende des Lebenszyklus im Verrottungs- oder Verbrennungsprozess wieder freigesetzt wird. Gleichzeitig entsteht durch den Holzeinschlag in nachhaltig bewirtschafteten Wäldern Raum für neues Baumwachstum, wobei wiederum CO<sub>2</sub> eingelagert werden kann. (Wegener et al., 2010, S. 6–7)

Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft hat den Beitrag der Forst- und Holzwirtschaft zu Deutschlands CO<sub>2</sub>-Bilanz mit einer Senke von 127 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. pro Jahr quantifiziert. Diese Kohlenstoffsенke setzt sich aus vier Kategorien zusammen:

- Waldspeicher: Durch Wachstum des Baumbestands gebundener Kohlenstoff (58 Mio.t CO<sub>2</sub>-Äq./Jahr)
- Holzspeicher: In Holzprodukten gebundener Kohlenstoff (3 Mio.t CO<sub>2</sub>-Äq./Jahr)
- Substitutionspotential stofflich: Durch den Ersatz fossiler Rohstoffe vermiedene Emissionen (30 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq./Jahr)
- Substitutionspotential energetisch: Durch den Ersatz fossiler Brennstoffe vermiedene Emissionen (36 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq./Jahr)

Dieser Kohlenstoffsенke gegenüberzustellen sind die Emissionen für Vorleistungen und Waldbewirtschaftung von < 1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq./Jahr sowie die Herstellung von Holzprodukten, auf welche etwa 6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq./Jahr entfallen. (WBAE & WBW, 2016, S. 9)

Im Vergleich zur deutschlandweiten Gesamtemission von 810 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. in 2019 (Umweltbundesamt, 2021c) wird deutlich, dass die Kohlenstoffsенke der deutschen Forst- und Holzwirtschaft 15,7 % beträgt.

Neben der Speicherung von Kohlenstoff bis zum Zeitpunkt der Verbrennung bzw. Verrottung sind geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Produktherstellung ein weiterer Vorteil von Holzbaustoffen. Abbildung 10 visualisiert die zur Herstellung durchschnittlich aufgewendeten CO<sub>2</sub>-Emissionen (positives Vorzeichen) je Tonne bzw. Kubikmeter Baustoff sowie das CO<sub>2</sub>, welches der Atmosphäre im Zuge des Holzwachstums entzogen wird (negatives Vorzeichen).

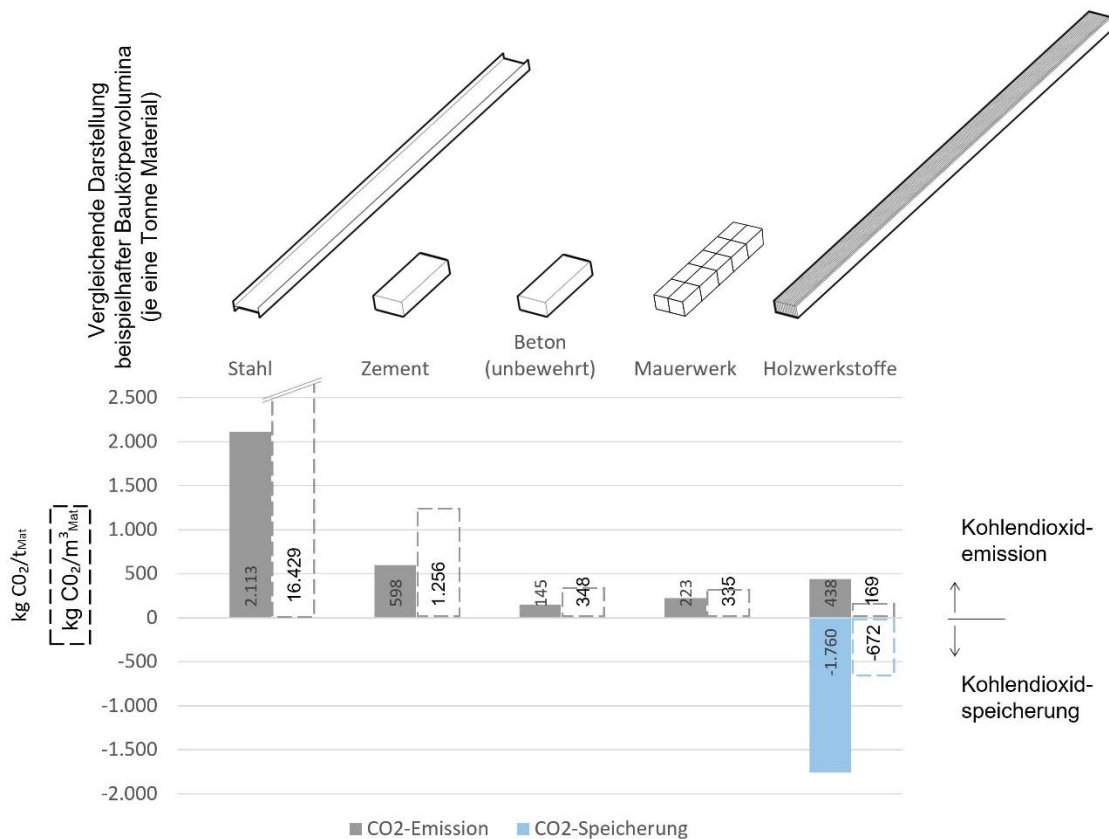


Abbildung 10: CO<sub>2</sub>-Emission bzw. -speicherung in der Herstellungsphase (Cradle-to-Gate) nach eigener Darstellung gemäß (Pomponi & Moncaster, 2018) und (Churkina et al., 2020, Fig. 2)

Zur Berechnung der Kohlenstoffspeicherung in Holz wurde ein Massenverhältnis von  $M_{\text{Kohlenstoff}}/M_{\text{Holz}} = 0,476$  angesetzt, welches den weltweiten Durchschnitt verschiedener Baumarten repräsentiert (Martin et al., 2018). Der rechnerische Zusammenhang des stofflich gespeicherten Kohlenstoffs in Holz und der Menge an entzogenem atmosphärischen CO<sub>2</sub> definiert sich hierbei über das Verhältnis der molaren Massen  $m_C = 12 \frac{g}{mol}$  und  $m_{CO_2} = 44 \frac{g}{mol}$ .

Die Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Holzproduktherstellung erfolgt auf Basis von Datensätzen unterschiedlicher Holzbaustoffe wie beispielsweise Konstruktionsvollholz, Brettschicht- und Brettsperrholz, Holzspan-, Holzfasern- und OSB-Platten. Auch die Kategorie Mauerwerk besteht aus einer Mischkalkulation verschiedener Mauerwerkstypen wie Hohlloch-, Kalksandsteinziegel oder Betonformsteine. (Pomponi & Moncaster, 2018, S. 2435–2437)

Zur Berechnung der Emissionen je Kubikmeter Material sowie zur qualitativen Visualisierung eines möglichen Baukörpervolumens wurde von gemittelten Rohdichten gemäß (Bergner et al., 2016, 3.9-3.10) ausgegangen. Weiterhin ist zu den abgebildeten

Emissionswerten zu bemerken, dass Beton i.d.R. mit Stahl bewehrt und Mauerziegel mit Zementmörtel gemauert werden, sodass die realen Emissionen für ein funktionsfähiges Bauteil höher zu bewerten sind.

Abbildung 10 verdeutlicht, dass die Herstellung von Holzprodukten weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht als Bauteile gleicher Abmessungen aus nicht nachwachsenden Rohstoffen wie Stahl, Beton oder Mauerwerk.

Neben der vorteilhaften CO<sub>2</sub>-Bilanz ist Holz als nachwachsender Rohstoff geeignet, um knapper werdende fossile Rohstoffe in vielfältigen Anwendungsbereichen des Bauwesens zu ersetzen. Holz kann beispielsweise in der Tragkonstruktion, als Schallschutz- oder Wärmedämmmaterial sowie im Innenausbau eingesetzt werden.

Um knapper werdende Primärrohstoffe zu schonen und negative Umweltwirkungen zu vermeiden, ist ein effizienter Umgang mit Ressourcen anzustreben. In diesem Zusammenhang gilt das Prinzip der Kreislaufwirtschaft als zukunftsfähiges Konzept zur Umsetzung höherer Ressourceneffizienz. (Deutsches Bundeskabinett, 2020)

Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, Produkte so lange wie möglich im anthropogenen Kreislauf zu halten und damit den stetig steigenden Bedarf an Primärrohstoffen mittels Sekundärrohstoffen einzudämmen (European Environment Agency, 2016, S. 9).

Dies kann durch die Weiter- und Wiederverwendung, gleich- oder minderwertige stoffliche Verwertung sowie durch energetische Verwertung erfolgen. Optimalerweise wird der Wert eines gebrauchten Produkts durch den Einsatz in gleichwertiger Funktion und Form erhalten. Gemäß einer Studie in Süd-Ost Deutschland eignen sich etwa 50 % des bei einem Gebäudeabbruch anfallenden Altholzes für eine weitere Verwendung. Für den Fall, dass Altholzteile nicht wieder gleichwertig eingesetzt werden können, eignet sich der Rohstoff Holz besonders für ein mehrfaches stoffliches Downcycling mit abschließender thermischer Verwertung, die sogenannte Kaskadennutzung. Insbesondere, wenn die Nachfrage nach stofflich genutzten Holzprodukten, wie Holzbaustoffen, zunimmt, lohnt sich die Nutzung des Rohstoffes in Kaskaden. (Höglmeier, 2015, S. 2–22)

Abbildung 11 zeigt das Vorgehen anhand beispielhafter Sekundärprodukte, wobei die Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung in andere Produkte mit fortschreitender Anzahl an Produktlebenszyklen sinkt.



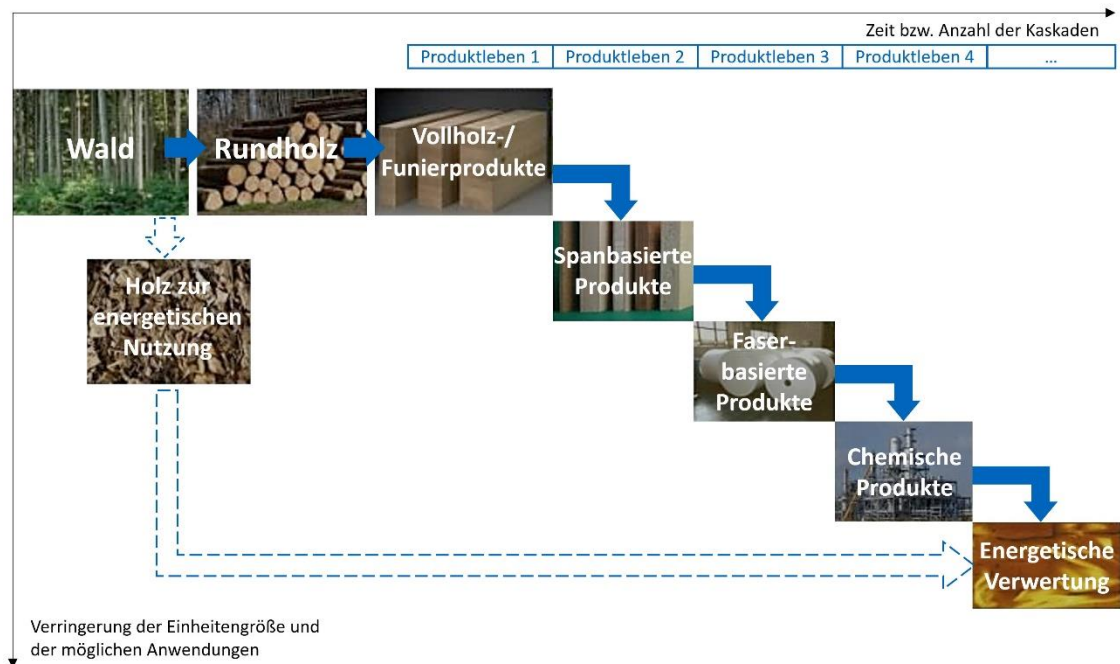


Abbildung 11: Konzept der Kaskadennutzung von Holzprodukten nach eigener Darstellung gemäß (Höglmeier, 2015, S. 7)

Mit der langen Nutzungsdauer, die bei Holzprodukten über mehrere Produktleben hinweg möglich ist, werden Synergieeffekte einer maximalen Speicherzeit des gebundenen Kohlendioxids geschaffen.

Über die sehr gute Treibhausgasbilanz und die Möglichkeit zur Ressourcenschonung hinaus bieten nachhaltig bewirtschaftete Wälder mannigfaltige Ökosystemleistungen. Diese umfassen neben ökologischem Nutzen wie Biodiversitätserhalt und Luft- und Wasserreinhaltung auch soziale und ökonomische Gewinne für den Menschen. Abbildung 12 zeigt einige Beispiele derartiger Leistungen eines Waldes.



Abbildung 12: Ökosystemleistungen nachhaltig bewirtschafteter Wälder nach eigener Darstellung gemäß (Umweltbundesamt, 2021b)

### 3.3.2. Ökonomische Vorteile

Erfahrungen der Firma LiWood zufolge erwarten Bauherren bei modularer Bauweise häufig deutliche Ersparnisse in den Erstinvestitionskosten des Gebäudes. Diese Fehleinschätzung könnte aus den in Abschnitt 3.1 erwähnten begrifflichen Unklarheiten zwischen modularem und seriellem Bauen stammen. Bei seriell gebauten Typenhäusern können sich bei hohen Repetitionsfaktoren Skaleneffekte zeigen, die auf verringerten Planungsaufwand zurückgeführt werden können (Winter et al., 2019, S. 15, S. 311). Wie auch die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Lebenszykluskostenanalyse zeigen, gleichen die Kosten des Holzmodulbau-Projekts „Montessori Schule“ eher den oberen Grenzwerten eines ebenso großen Schulgebäudes in konventioneller Massivbauweise (siehe Kapitel 6).

Ökonomische Stärken weist der modulare Holzbau hinsichtlich der Kostensicherheit für Bauherren auf, wenn ein Pauschalvertrag mit einem Generalunternehmer abgeschlossen wird. Der frühzeitig hohe Planungsstand und der Entfall ausführungsbegleitender Planung kann diese Sicherheit unterstützen.

Ein weiterer Vorteil, der im Zuge der Lebenszykluskostenanalyse im engeren Sinn nicht erfasst werden kann, sind die früheren Mieteinnahmen, die ein Bauherr durch die verkürzte Bauzeit erzielt. LiWood wirbt hierzu beispielhaft mit einer Reduktion der Rohbau- und Fertigstellungszeit von 12 auf rund 7 Monate im Vergleich zu konventionellem Bau, wobei die vorgelagerte Zeit für Baustelleneinrichtung und Fundamentherstellung im konventionellen sowie modularem Bau identisch ist (LiWood AG, 2019). Die Firma Alho spricht in einem Interview mit der Immobilien Zeitung von einer Zeitersparnis von bis zu 70% (Hillemacher, 2018). Ebenfalls nicht in den Lebenszykluskosten erfasst werden Förderungen für Holzbauten durch Städte und Kommunen. Diese werden häufig je verbautem Kilogramm Holz oder nachwachsendem Rohstoff (Nawaros) gewährt und können deutliche Kostenvorteile mit sich bringen. Als Beispiel kann der Prinz-Eugen-Park in München mit einer Förderung von  $0,70$  bis  $2,00 \text{ €/kg}_{\text{nawaros}}$  je  $\text{m}^2$  Wohnfläche (Opitsch, 2018, S. 6) genannt werden. Auch die Stadt Freiburg bietet  $1,00$  bis  $1,20 \text{ €/kg}_{\text{nawaros}}$  (Stadt Freiburg, 2020, S. 2) und die Stadt Hamburg fördert Holzbauten mit  $0,80 \text{ €/kg}_{\text{Holzprodukt}}$  (IFB Hamburg, 2021, S. 6). Im Analyseobjekt „Montessori Schule“ sind rund  $890.300 \text{ kg}$  Brettsperr-, Brettschicht und Konstruktionsvollholz verbaut. Dadurch könnten entsprechend des oben genannten Beispiels der Stadt Hamburg ein Förderbetrag von  $712.240 \text{ €}$  erzielt werden, wenn im Umfeld des errichteten Gebäudes eine entsprechende Förderung gilt.

Des Weiteren bietet die witterungsgeschützte Produktion optimale Bedingungen und Ausstattung für eine konstant hohe Qualität sowie einen attraktiven Arbeitsplatz (Staub et al., 2008, S. 40). Diese Kriterien können sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit eines Projekts auswirken, wenn durch hochwertige Fertigungsprozesse weniger Gewährleistungsfälle auftreten und witterungsbedingte Baustopps abgewendet werden können. Besonders in Zeiten des Arbeitskräftemangels im Baubereich ist es von Vorteil einen komfortablen Arbeitsplatz im Innenbereich bieten zu können, um so Mitarbeiter zu binden und als Unternehmen handlungsfähig zu bleiben.

Der Werkstoff Holz birgt darüber hinaus den Vorteil seiner geringen Rohdichte, sodass das Transportgewicht eines LKWs selbst bei optimaler Ausnutzung der zulässigen Standardtransportabmessungen nicht zur determinierenden Größe wird. Wichtig ist das Eigengewicht der Module auch in Hinblick auf Bestandsaufstockungen, da die zusätzliche Tragfähigkeit bestehender Bauten oftmals stark begrenzt ist. Derartige Nachverdichtungsmaßnahmen ohne weitreichenden Eingriff in den Bestand sind häufig nur als Holzkonstruktionen möglich.

Als letztes Beispiel für ökonomische Vorteile modularer Bauweise dient der reduzierte Bedarf an Baustelleneinrichtungs- und Lagerflächen direkt an der Baustelle. Besonders in innerstädtischen Lagen kann die „Just-in-time“-Lieferung fertiger Module die Anmietung von Lager- und Stellflächen ersparen und so wirtschaftliche Vorteile bieten.

### **3.3.3. Soziale Vorteile**

Auch soziale Belange der Stakeholder in einem Immobilienprojekt sind zu beachten. So bieten einige bereits erörterte Vorteile von Holzmodulbauten aus Brettsperrholz auch soziale Stärken. Der geringe Bedarf an Flächen für Baustelleneinrichtung und Lagerung kommen ebenso den Anwohnern zugute, wenn dadurch räumliche Störfaktoren wie häufige Straßensperrungen vermieden werden können. Zusätzlich können durch die wenigen Prozesse vor Ort sowie die kurze Bauzeit Lärmbelästigungen der Nachbarn reduziert werden, wie auch das Wohnungsbauunternehmen Vonovia gegenüber der Immobilien Zeitung bestätigt (Hillemacher, 2018).

Bei der Attraktivität eines witterungsunabhängigen Arbeitsplatzes ist neben dem ökonomischen Vorteil für das ausführende Unternehmen auch der Wert für die Arbeiter dieses Sektors zu bedenken. So kann die Produktion von Modulen auch im Winter erfolgen und damit die Arbeitsplätze und die Gesundheit der Arbeiter saisonübergreifend gesichert werden.

Ebenso wurde bereits in Abbildung 12 erläutert, dass ein nachhaltig bewirtschafteter Wald auch sozialen Belangen wie einem hohen Erholungs- und Freizeitwert gerecht wird.

Für zukünftige Nutzer bietet ein Bauwerk aus Brettsperrholz ein angenehmes Wohnklima durch den guten Feuchteausgleich und die Wärmespeicherfähigkeit des massiven Holzes. Beispielsweise Salthammer & Marutzky bieten über den Informationsdienst Holz eine umfangreiche Abhandlung über den Wert von Holz im Innenraum und die Baubiologie des Baustoffes. (Salthammer & Marutzky, 2013)

Des Weiteren ist im Gegensatz zu Holzständer- oder Gipskartonkonstruktionen eine uneingeschränkte, unkomplizierte Lastbefestigung an Massivholzwänden möglich, was die Nutzerfreundlichkeit des genutzten Raums erhöht (Mestek et al., 2016, S. 5).

Abschließend ist der soziale Vorteil einer geringen Bauzeit zu beachten, wodurch dringliche Projekte schnell umsetzbar werden. Zum Beispiel ist die Eröffnung von Schulen oder Studierendenwohnheimen oftmals bis zum Semester- bzw. Schuljahresstart geplant. Dabei ist eine kurze Bauzeit mit reduziertem Risiko für Verzögerungen durch planungs- oder witterungsbedingte Störungen von Vorteil. Dies ist einer der Gründe, weshalb 38 % der Entscheidungsträger im Bildungsbau als alternative Bauweise zum Massivbau den Modulbau in Betracht ziehen (Horváth & Partners, 2017). Auch im Bereich des (sozialen) Wohnungsbaus in Ballungsräumen mit akutem Wohnraumbedarf oder beim Bau von Flüchtlingsunterkünften ist eine sehr kurze Bauzeit notwendig.

### 3.4. Hemmnisse

Trotz der allgemein hohen Bewusstheit über die Notwendigkeit zu umweltverträglichem, nachhaltigen Handeln (Gellrich, 2021) sowie der bekannten ökologischen Vorteile des Baustoffes Holz, zeichnet sich in der deutschen Bauindustrie lediglich eine moderate Zunahme der Holzbauquoten ab, wie Abbildung 13 dargestellt.

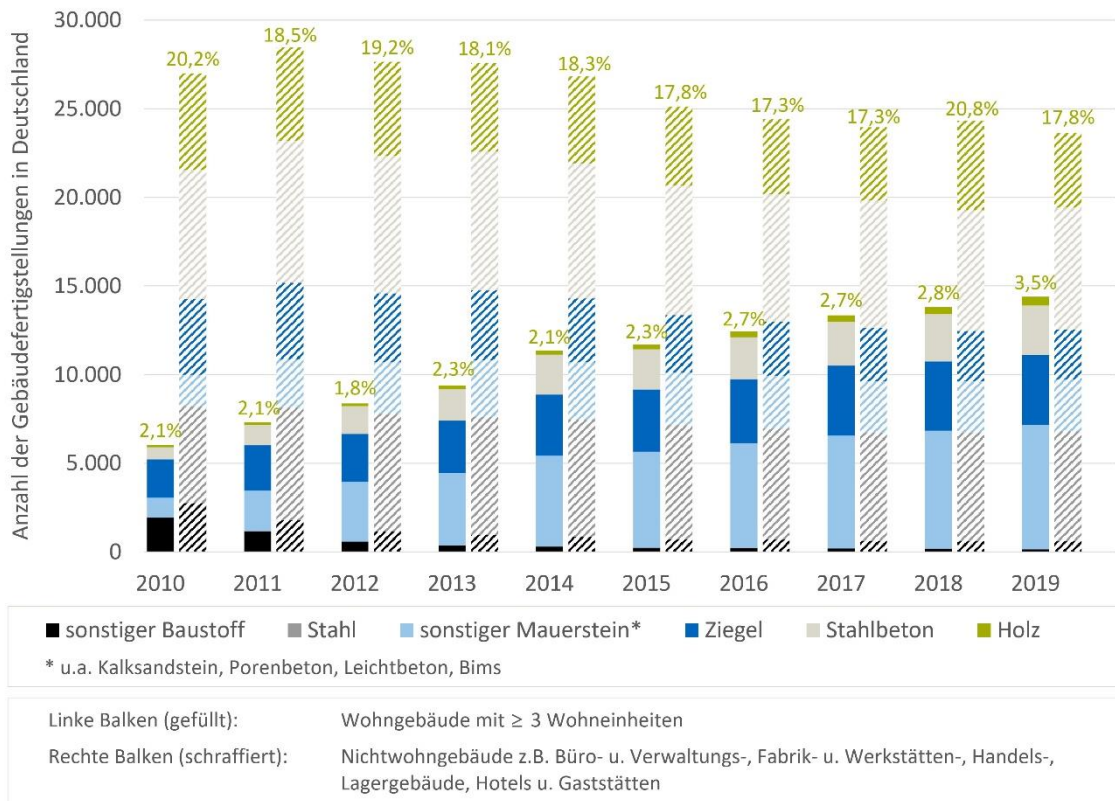


Abbildung 13: Baufertigstellungen von Wohngebäuden mit  $\geq 3$  Wohneinheiten und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff in Deutschland nach eigener Darstellung gemäß (Statistisches Bundesamt, 2020)<sup>2</sup>

Holz wird bisher nur selten als überwiegender Baustoff eingesetzt und findet mit einem Anteil von 20,3 % (2019) seine häufigste Anwendung im Ein- und Zweifamilienhausbau. Auch landwirtschaftliche Nutzgebäude und Lagerhallen werden häufiger mit hölzerner Tragstruktur konstruiert, was sich in 17,8 % Holzbauquote (2019) an den fertiggestellten Nichtwohngebäuden niederschlägt. Geschäfts- und Mehrfamilienhäuser, welche ein großes Volumen an Baumaterialien erfordern, werden dagegen selten aus Holz gebaut. Abbildung 13 zeigt eine Auswertung der Gebäudefertigstellungen mit 3 Wohnungen oder mehr bzw. der Nichtwohngebäude in Deutschland und stellt deren Anteil in Holzbauweise heraus. Es zeigt sich, dass die Holzbauquote im Mehrfamilienhausbau zwischen 2,1 und 3,5 % liegt (2010 bis 2019). (Statistisches Bundesamt, 2020)

Mineralische Baustoffe werden demnach weitaus häufiger in der Tragkonstruktion verwendet als Holz.

<sup>2</sup> Eine tabellarische Datenübersicht mit zusätzlichen Angaben zu überwiegend verwendeten Baustoffen im Ein- und Zweifamilienhausbau sowie Wohngebäuden aus Fertigteilen können 10.Anhang A entnommen werden.

Tabelle 2: Beispielhafte Hemmnisse beim Einsatz mehrgeschossigen Holzbaus gemäß (Hafner et al., 2017, S. 85–107)

<b>Themenbereich</b>	<b>Hemmnis</b>
Holzbaustrategie	Fehlende nationale Holzbaustrategie
Branchenkapazität	Fehlende Kapazität der klein- und mittelständischen Unternehmen zur Realisierung des mehrgeschossigen Holzbaus
Aktuelle Normung	Wiederspiegelung des neuesten Stands der Technik innerhalb der Normung
Standardisierung	Fehlende Standardisierung innerhalb der Holzbauweise
Integration TGA	Fehlende frühe Integration der technischen Gebäudeausrüstung
Verwendbarkeitsnachweise	Notwendigkeit und Komplexität bei der Erstellung von Verwendbarkeitsnachweisen
Klimaschutzbeitrag Nawaros	Geringe Berücksichtigung des klimapositiven Beitrags nachwachsender Rohstoffe (Nawaros) bei der Planung von Gebäuden
EoL-Szenarien	Fehlende Szenarien-Entwicklung der weiteren Verwendung von Holzprodukten am Lebensende eines Gebäudes (EoL-Szenarien)
Fachkräftemangel	Spezifischer Fachkräftemangel aufgrund geringer Ausbildungsangebote für Architekten und Fachplaner im Holzbau
Fachinformationsangebot	Geringe Informations-/Beratungsangebote zu Detail- und Ausführungslösungen für Fachplaner
Weiterbildungsangebot	Geringe Informations-/Weiterbildungsmöglichkeiten nicht fachspezifischer Entscheidungsträger
Emissionen im Innenraum	Fehlende Differenzierung zwischen natürlichen und synthetischen Emissionen aus Holzprodukten
Forschungskoordination	Das Fehlen einer übergeordneten Institution zur Förderung/Koordination der Wissenschaft und Forschung im Holzbau
Rohstoffverfügbarkeit	Unsichere Rohstoffverfügbarkeit aufgrund von Fehlallokation, geringer Kaskadennutzung und Transformation von Forst und Markt

Hafner et al. bieten ein ausführliches Kapitel über Hemmnisse im mehrgeschossigen Holzbau, dessen Inhalt die Aggregation verschiedenster Studienergebnisse, Praxiserfahrungen und Befragungen abbildet und die Hintergründe sowie Zusammenhänge ausführlich erläutert. Tabelle 2 listet eine Auswahl der Hemmnisse dieser Studie auf. Zu beachten ist, dass die genannte Abhandlung aus dem Jahr 2017 stammt und die Hemmnisse einer dynamischen Entwicklung unterliegen, sodass sich einige Schwierigkeiten

beim Einsatz mehrgeschossiger Holzbauten bereits lösen konnten. (Hafner et al., 2017, S. 81–134)

So zeigt die geschichtliche Entwicklung, dass der Baustoff Holz durch Großbrände wie in London 1666 und Kriegsgeschehen in späteren Jahren aufgrund seiner Brennbarkeit in Verruf und dessen Anwendung durch gesetzliche Auflagen zum Brandschutz letztendlich eingedämmt wurde. Erst im Jahr 2015 öffnete die Baden-Württembergische Landesbauordnung die Regelungen, sodass die Verwendung von Holz auch über die Gebäudeklassen 1 bis 3 hinaus möglich ist. Seit 2020 verdeutlicht die Neuerung der Muster-Holzbaurichtlinie, dass Holzbau nach heutigem Stand der Technik hinsichtlich des Brandschutzes ebenso geeignet ist wie mineralische Baustoffe. Dem flächendeckenden, geregelten Einsatz von Holz bis zur Hochhausgrenze steht somit regulatorisch nichts mehr im Wege. (Merk, 2020, S. 583–584)

Das bekanntermaßen zögerliche Innovationsgeschehen der Bauindustrie (Ankrah et al., 2015, S. 52) sowie das ausbaufähige Knowhow der Fachplaner und Entscheidungsträger im Bereich Holzbau (Brakus, 2015, S. 53) können als Gründe für den bisher mäßigen Aufschwung des Baustoffes und insbesondere des modernen Holzmodulbaus genannt werden.

Darüber hinaus besteht seitens Stadt- und Kommunalverwaltungen sowie Nutzern und Planern Skepsis gegenüber modularen und vor allem seriellen Bauweisen. Häufig wird ein Erscheinungsbild gefürchtet, das den Plattensiedlungen der 1960er bis 1980er Jahre gleicht. (Borchardt & Ortiz, 2021; Winter et al., 2019, S. 14–16)

Wie auch in Tabelle 2 an zweiter Stelle gelistet, ist die Holzbaubranche stark von kleinen Bauunternehmen geprägt. 2019 lag die durchschnittliche Mitarbeiterzahl von Hochbauunternehmen in Deutschland bei 15, sodass 83% aller Betriebe weniger als 20 Mitarbeiter beschäftigen (RM Handelsmedien GmbH & Co. KG, 2019). Die Leistungsfähigkeit der vorrangig kleinen Unternehmen im Holzbau ist bei zusätzlichem Fachkräftemangel und hoher Auslastung stark eingeschränkt (Holzbau Deutschland, 2021). Der modulare Holzbau könnte diesem Hemmnis entgegenwirken, da hierbei weniger (Fach-)Personal benötigt wird und diesem ein attraktiver, witterungsgeschützter Arbeitsplatz geboten werden kann (siehe Abschnitt 3.3).

Im modularen Bauen kann auch die Befürchtung einer stark eingeschränkten Gestaltungsfreiheit in Grundriss und Optik die Anwendungsbereitschaft hemmen. Wie in Abschnitt 3.2 anhand des LiWood-Systems beschrieben und auch durch Winter et al. für seriellen, modularen Wohnungsbau gezeigt, ist vor allem im Modulbau aber auch im seriellen Bauen eine projektspezifische Anpassung an Nutzerwünsche möglich (Winter

et al., 2019, S. 137–140). Die Umnutzungsfähigkeit im LiWood-Holzmodulbau ist teilweise begrenzt und kann daher ein potenzielles Hemmnis und eine Einschränkung der nachhaltigen, flexiblen Nutzung darstellen. Eine spätere Variation der Wohnungsgrößen ist bei geschickter Planung im LiWood-System mit wenig Aufwand möglich. Änderungen der Nutzungsform mit großflächigen Grundrissanpassungen sind durch die oftmals lastabtragenden Massivholzzinnenwände allerdings begrenzt.

Der DGNB-Kriterienkatalog erfasst die Bewertung der Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit. Dieser fordert für Bildungsbauten über die Vermeidung tragender Innenwände hinaus einen möglichst hohen flächenbezogenen Effizienzwert ( $\frac{\text{nutzbare Fläche}}{\text{BGF}}$ ) sowie eine Raumhöhe von  $\geq 3,0$  m und gute Erschließung durch eine geringe geschossweise BBGF je Erschließungskern. In den genannten Kriterien können jeweils ähnlich viele Bewertungspunkte erzielt werden. (DGNB GmbH, 2018, S. 234–238)

Somit können auch im Holzmodulbau mit tragenden Innenwänden gute Leistungen im Sinne der Umnutzungsfähigkeit erzielt werden.

Das maßgebendste Hemmnis einer Bauweise dürften jedoch dessen Erstinvestitionskosten darstellen, da ein Immobilienprojekt in der Regel mit der Absicht realisiert wird, auf Dauer Gewinn zu erzielen. Um dies zu erreichen, sollen die notwendigen Erstinvestitionskosten privater Bauherren möglichst gering sein. Auch bei Bauwerken der öffentlichen Hand, wird ein besonderes Augenmerk auf die Baukosten gelegt, um die Ausgaben und damit die Verschuldung gering zu halten. Beim Zuschlag öffentlicher Bauaufträge ist eine deutliche Zunahme des reinen Preiskriteriums von 36 % (2013) auf 47 % (2016) zu verzeichnen, wenngleich §127 des Gesetzes gegen Wettbewerbsbeschränkungen (GWB), §58 der Vergabeverordnung (VgV) und §43 der Unterschwellenvergabeordnung (UVgO) ausdrücklich die Wahl des wirtschaftlichsten anstatt des preisgünstigsten Angebots fordern (Markus Schaupp et al., 2017, S. 1). Im Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen ist dabei eindeutig vermerkt, dass „neben dem Preis oder den Kosten auch qualitative, umweltbezogene oder soziale Aspekte berücksichtigt werden“ (GWB/2013-06-26, § 127) können. Gerade bei Aufträgen der öffentlichen Hand erscheint es naheliegend, Umweltaspekte in die Betrachtungen einfließen zu lassen, da Gesellschaft und Staat als übergeordnete Organisation Träger externer Umweltkosten sind (Umweltbundesamt, 2021a), welche durch Herstellung, Nutzung und Betrieb von Gebäuden entstehen. Bisher fehlen jedoch explizite gesetzliche Anforderungen an die Umweltverträglichkeit von Baustoffen (Ankrah et al., 2015, S. 52) oder deren zwingende Berücksichtigung in Vergabeverfahren.



## 4. Umweltkosten - Grundlagen

Unterlassener Umweltschutz hat Kosten zur Folge, welche heute größtenteils von der Allgemeinheit getragen werden. Diese Kosten entstehen beispielsweise durch Gesundheitsbeeinträchtigungen, Biodiversitätsverluste oder Klimaschäden als Folgen umweltschädlicher Emissionen. (Umweltbundesamt, 2021a)

Da die Berechnung von Umweltschäden einen komplexen Vorgang darstellt, dessen Auswertung interdisziplinäre Fachkenntnisse erfordert, fehlt unter den Stakeholdern der Baubranche oftmals das Verständnis für derartige Umweltindikatoren. Darüber hinaus sind die Auswirkungen umweltschädlichen Verhaltens oftmals nicht direkt sichtbar oder zeitlich verschoben, sodass die Verursacher nicht unmittelbar betroffen sind. Der Rechtfertigungsdruck bei der Umsetzung und Etablierung umweltverträglicher Produkte, Investitionen oder Gesetze ist hoch und erfordert daher verständliche Argumente gegenüber allen Beteiligten verschiedenster Fachrichtungen. (Rathmann et al., 2019, S. 3)

Die Berechnung von Gebäudeumweltkosten als einzelner Gesamtparameter bietet eine Möglichkeit die ökologischen Kriterien eines Immobilienprojekts in allseits bekannten monetären Werten zu kommunizieren und eine Berücksichtigung im Planungsprozess anzuregen (Pizzol et al., 2017).

Eine Definition für den Begriff „Umweltkosten“ bieten verschiedene einschlägige Studien sowie ein neuer Entwurf der ISO/DIS 21931-1. Dieser beschreibt die Begriffe „external costs“, „environmental cost“, „social cost“ und „externality“, welche den Themenbereich im Wesentlichen abdecken (ISO, 2021, S. 7–9).

Einige Veröffentlichungen zum Thema Umweltkosten lassen sich ebenfalls unter dem Titel „Externe Kosten“ oder „Externalitäten“ finden. Diese Begriffe werden häufig als Synonym für Umweltkosten verwendet, umfassen jedoch gegebenenfalls nur einen Teil dieser. Externalitäten (auch: externe Effekte) beschreiben die unbezahlten Auswirkungen einer Wirtschaftsaktivität auf Unbeteiligte. Diese Effekte können sowohl positiv (Nutzen) als auch negativ (Schaden/ Kosten) sein. Die von der Gesellschaft zu tragenden, nicht vom Verursacher beglichenen Folgen von Umweltbelastungen können somit als negative externe Effekte oder in monetarisierter Form als externe Kosten bezeichnet werden. (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [BMVBS], 2010, S. 22–24)

Mittlerweile existiert in Deutschland ein kleiner Anteil an Umweltkosten, der nach dem Verursacherprinzip internalisiert wurde, d.h. vom Verursacher zu bezahlen ist und

demnach in dessen Wirtschaftlichkeitsberechnungen einbezogen wird (siehe Abschnitt 4.1). Umweltkosten umfassen im Rahmen dieser Arbeit

- sowohl externe Kosten,
- als auch bereits teilweise internalisierte Kosten im Sinne der sog. CO<sub>2</sub>-Steuer
- welche aufgrund von negativen Umweltwirkungen
- über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes entstehen.

Dies bedeutet, dass das gesamte globale Treibhauspotenzial, welches über den Lebenszyklus des Beispielobjekts verursacht wird, bilanziert, monetär bewertet und den Umweltkosten zugerechnet wird. Die berechneten Umweltkosten werden in dieser Arbeit nicht um eine potenziell bereits bezahlte CO<sub>2</sub>-Steuer reduziert.

Des Weiteren ist eine Abgrenzung zwischen Schadenskosten und Vermeidungskosten notwendig, da einschlägige Studien beide Ansätze zur Berechnung von Umweltkosten nutzen. Schadenskostensätze monetarisieren, wie oben beschrieben, einen verschlechterten Umwelt- und Gesundheitszustand und damit die Kosten, die der Gesellschaft durch den verlorenen Nutzen entstehen. Zum Beispiel verringert die Klimawirkung einer ausgestoßenen Tonne CO<sub>2</sub> die Ernteerträge, wodurch der Gesellschaft Schäden entstehen, welche monetär bewertet und Teil der Schadenskosten für CO<sub>2</sub> werden können. Für die Berechnung von Schadenskosten sind komplexe Modelle zur Abbildung der Wirkketten notwendig. In der Wissenschaft existieren verschiedene Berechnungsmodelle. Darüber hinaus wird im Rahmen derartiger Berechnungen festgelegt, ob Schäden an ärmeren Bevölkerungsgruppen gleich gewichtet werden wie jene an Reichen (Equity Weighting) und wie hoch die Schäden für zukünftige Generationen gegenüber heutigen Generationen bewertet werden (Zeitpräferenzrate). Diese Festlegungen zu grundlegenden Fragen der Gerechtigkeit verursachen eine erhebliche Bandbreite an Schadenskostensätzen, die nicht rein der statistischen Unsicherheit zugeordnet werden dürfen. Diesem Ansatz gegenüber stehen Vermeidungskosten. Diese bilden den ökonomischen Aufwand zur Begrenzung von Schäden ab und stehen nicht im direkten Zusammenhang mit dem Schaden selbst. Es werden die Kosten für Maßnahmen berechnet, die zur Begrenzung der jeweiligen Emissionen aufzubringen sind. Als Basis dafür dient die Annahme eines bestimmten Zielwerts, auf welchen die Emission begrenzt werden soll. (Bünger & Matthey, 2018, S. 14, 35–38)

Zum Beispiel eine Reduktion von Treibhausgasemissionen auf 70 % gegenüber 2008 kann als ein solcher Grenzwert dienen. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen beispielsweise je ausgestoßener Tonne CO<sub>2</sub> 116 € in den Ausbau von Off-Shore Windkraftwerken investiert werden. (Sustainability Impact Metrics, 2021)

Häufig wird auch der Umfang berücksichtigter Methoden zur Vermeidung von Umweltschäden begrenzt, um konkrete Kosten abbilden zu können. Die Vermeidungskosten sind eher als Untergrenze der tatsächlichen Umweltkosten anzusehen. Generell können beide Ansätze nicht alle Schäden und Auswirkungen abschließend erfassen und bilden damit in der Regel nur einen Teil davon ab. Insgesamt ist daher zu erwarten, dass die realen Kosten negativer Umweltwirkungen höher liegen. (Bünger & Matthey, 2018, S. 14, 35–38)

Gebäude können über den gesamten Lebenszyklus – vom Rohstoffabbau und die Bauproduktherstellung über den Objektbetrieb bis zur Entsorgung – Umweltwirkungen und dadurch oben genannte Schäden verursachen bzw. Vermeidungskosten notwendig machen. Mit der Durchführung einer LCA lassen sich diese Wirkungen berechnen und mit Umweltkostensätzen aus einschlägiger Literatur monetarisieren. In Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wird detaillierter erläutert, wie in dieser Arbeit methodisch vorgegangen wurde, um die Umweltkosten des Beispielgebäudes abzuschätzen. Welche konkreten Rahmenbedingungen zur Durchführung der LCA herangezogen werden, ist Abschnitt 5.1 zu entnehmen. Abschnitt 5.3 beschäftigt sich mit der monetären Gewichtung der Ökobilanzergebnisse und dokumentiert, welche Umweltkostensätze dazu verwendet werden.

## 4.1. Stand der Technik

Nachstehend wird erläutert, in welchem Umfang und in welchen Bereichen Umweltkosten aktuell verwendet werden. Zunächst wird dargestellt, inwieweit und mittels welcher Instrumente Umweltkosten bereits internalisiert sind. Anschließend folgt eine knappe Zusammenfassung, in welchen Fällen Umweltkosten aktiv berechnet werden.

### 4.1.1. Internalisierung

Insbesondere seit Ende des Jahres 2020 wird die Internalisierung von Umweltkosten in Deutschland öffentlich diskutiert. Anstoß hierfür gab die Änderung des Brennstoffemissionshandlungsgesetzes (BEHG), welche am 10. November 2020 in Kraft trat und an das bereits bestehende europäische Bepreisungssystem für CO<sub>2</sub>-Emissionen anschließt.

Bereits im Jahr 2005 wurde mit dem Emissionshandelssystem der Europäischen Union (EU-ETS) ein bedeutendes Instrument der EU-Klimapolitik und damit der aktuell größte internationale Markt für den Handel mit CO<sub>2</sub> eingeführt. Ziel des Systems ist es, die

Treibhausgasemissionen durch monetären Anreiz zu senken und so zu den Klimaneutralitätsbestrebungen der EU beizutragen. (European Commission, 2021).

Im Rahmen der Richtlinie müssen Betreiber bestimmter emissionsintensiver Industrien ab einer gewissen Anlagengröße Zertifikate für jede emittierte Tonne CO<sub>2</sub> vorweisen können. Im EU-ETS erfasst werden beispielsweise die Energieproduktion mittels fossiler Energieträger, Raffinerien, Produktion von Eisen, Stahl, Aluminium, Zement, Gips, Glas, Ziegel und Mineralfasern, die Zellstoff- und Papierherstellung sowie die Chemieindustrie. Die benötigten Zertifikate werden bis heute zu einem bestimmten Anteil kostenlos an die Anlagenbetreiber vergeben. Wird mehr CO<sub>2</sub> ausgestoßen als einer Anlage in Form kostenloser Zertifikate zur Verfügung gestellt wurde, so müssen die fehlenden Zertifikate bei Versteigerungen erworben werden. Andernfalls werden Geldbußen in Höhe von 100 € je Tonne CO<sub>2</sub> fällig. (BMW, 2020)

Besonders den Anlagenbetreibern emissionsintensiver verarbeitender Industrien werden auch heute noch ein Großteil der Zertifikate kostenlos zur Verfügung gestellt, so dass weitestgehend keine Kosten für den Ausstoß klimaschädlicher Gase fällig werden. Damit soll eine Minderung der Wettbewerbsfähigkeit und dadurch eine Abwanderung der in der EU produzierenden Industrieanlagen verhindert werden. Gemäß einem Sonderbericht des Europäischen Rechnungshofs wurden vor allem der Zement- und Stahlindustrie bisher erheblich mehr kostenlose Emissionszertifikate überlassen als die Anlagen tatsächlich an Treibhausgasen emittieren. Damit konnten die begünstigten Anlagen in den vergangenen Jahren durch den Verkauf der überschüssigen Zertifikate an andere Industrien sogar Gewinne erzielen. Zwischen 2013 und 2018 konnte die Zement- und Kalkindustrie einen Anteil von etwa 95 bis 120 % ihrer Treibhausgasemissionen mittels kostenloser Emissionszertifikate abdecken. Die Stahlindustrie übertrifft dies mit einer Deckung von rund 120 bis 135 %. In der 2021 angelaufenen neuen Phase des EU-ETS soll sich dieser Umstand jedoch ändern. Auch Industrien, bei welchen eine Gefährdung zur Verlagerung außerhalb der EU vermutet wird, bekommen maximal die Menge an Zertifikaten kostenlos zugeteilt, die die emissionsärmsten Anlagen der entsprechenden Branche in Form eines Benchmarks vorgeben. (Europäischer Rechnungshof, 2020, S. 4–13)

Abbildung 14 zeigt, dass sich bereits eine deutliche Steigerung der Zertifikatspreise abzeichnet. Der derzeitige Durchschnittspreis (Januar - Juni 2021) liegt bei 44,60 €/t CO<sub>2</sub> (Deutsche Emissionshandelsstelle [DEHSt], 2021, S. 7). Begründen lässt sich dies vor allem im gezielten Abbau des sich am Markt befindlichen Zertifikatüberschusses,

wodurch sich das EU-ETS zunehmend zu einem funktionierenden Klimaschutzinstrument transformieren soll (European Commission, 2021).

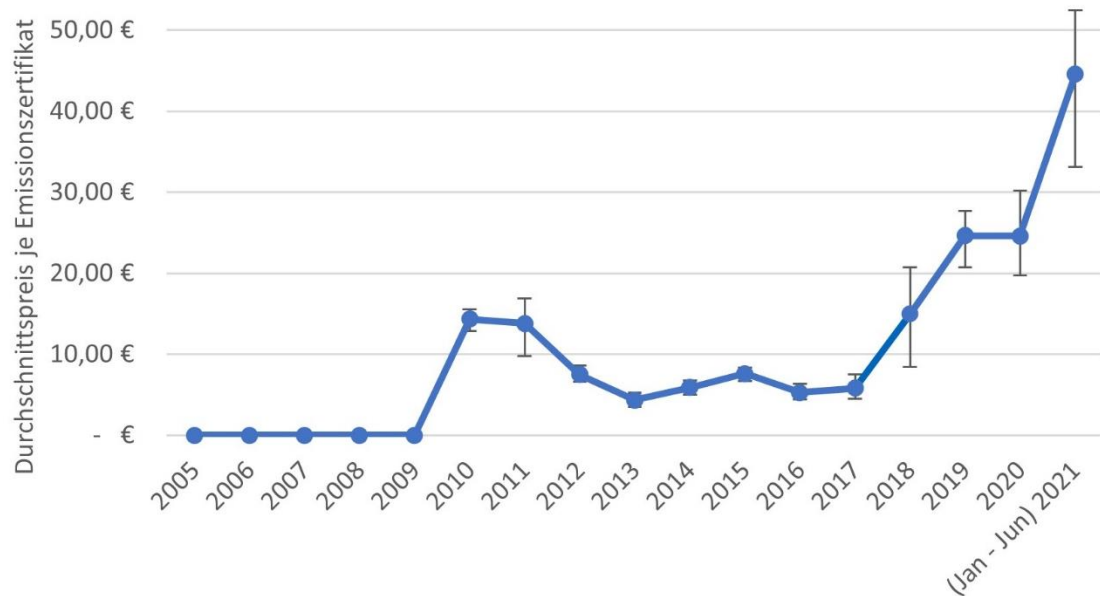


Abbildung 14: Entwicklung der jährlichen Durchschnittspreise für Emissionszertifikate des EU-ETS nach eigener Darstellung mit Daten gemäß (DEHSt, 2005-2021)

Um weitere emissionsintensive Bereiche zu erfassen, welche durch das EU-ETS bisher nicht abgedeckt werden, wurde in Deutschland eine Änderung des nationalen BEHG beschlossen, welches zum 1. Januar 2021 in Kraft trat. Dieses Gesetz regelt die CO<sub>2</sub>-Bepreisung für fossile Heiz- und Brennstoffe wie Diesel, Benzin oder Heizöl und betrifft somit gezielt den Verkehrssektor und die Gebäudenutzung. (BMW, 2020)

Derzeit ist für die genannte nationale CO<sub>2</sub>-Bepreisung fossiler Heiz- und Brennstoffe die in Tabelle 3 dargestellte Staffelung vorgesehen.

Tabelle 3: Staffelung der CO<sub>2</sub>-Bepreisung für fossile Heiz- und Brennstoffe gemäß (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG, 2020, § 10)

	2021	2022	2023	2024	2025	2026
CO <sub>2</sub> -Preis [€/t CO <sub>2</sub> -Äq]	25	30	35	45	55	min. 55 – max. 65

Aus wirtschaftlicher Sicht der Anlagenbetreiber werden die zusätzlichen Kosten, welche durch die Kaufpflicht von Zertifikaten je Tonne emittiertem CO<sub>2</sub> fällig werden, zu einem größtmöglichen Teil an den Endkunden weitergereicht. Infolgedessen werden einerseits Anreize für die betroffenen Betreiber geschaffen die Produktion emissionsärmer zu gestalten und dadurch ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Andererseits wird der

Endverbraucher durch höhere Kosten dazu motiviert, den Kauf umweltverträglicher Alternativen in Betracht zu ziehen. In Folge dieser Entwicklungen ist es realistisch auch für die Herstellung energie- und damit emissionsintensiver Baustoffe mit einer steigenden CO<sub>2</sub>-Bepreisung zu rechnen.

Der 2019 gestartete Einbehalt überschüssiger Zertifikate in der sogenannten „Marktstabilitätsreserve“ des EU-EST hat deutliche Auswirkungen auf den Versteigerungspreis je Zertifikat und damit je ausgestoßener Tonne CO<sub>2</sub> (European Commission, 2021). Auch in Zukunft können derartige Änderungen beschlossen werden, um zur Erfüllung der gesetzlich verpflichtenden Klimaziele des European Green Deals beizutragen. Beispielsweise wurde bereits die Wirksamkeit eines sog. CO<sub>2</sub>-Grenzausgleichssystems geprüft, welches den Import aus Ländern ohne vergleichbare Auflagen bepreisen könnte (Europäischer Rechnungshof, 2020). Die weitere Entwicklung der Preise für Emissionszertifikate ist dadurch nur schwer abzuschätzen, da diese stark durch die Änderung regulatorischer Rahmenbedingungen beeinflusst werden.

Auch die International Energy Agency hatte die Entwicklung der Preise im Rahmen ihrer Studie zum World Energy Outlook 2017 unterschätzt. Selbst im „New Policies“-Szenario wurden für die EU erst 2025 Preise in Höhe von 25  $US\ \$/t\ CO_2$  erwartet (International Energy Agency, 2017, S. 48). Bei einer Kaufkraftparität (Deutscher € zu US\$ im Jahr 2016) von 0,753 (OECD.Stat, 2021) entspricht dies rund 18,83  $€/t\ CO_2$ . Dieser Wert wurde bereits im August 2018 überschritten (DEHSt, 2018, S. 5). Bis Juni 2021 stieg der Preis auf 52,47  $€/t\ CO_2$  (DEHSt, 2021, S. 7).

Eine Wirksamkeitsanalyse der schwedischen CO<sub>2</sub>-Steuer bestätigt, dass die Emissionen im Bereich Haushalt und Wohnen ab einem Steuersatz größer 120  $€/t\ CO_2$  effektiv reduziert werden können (Runst & Thonipara, 2019, S. 20). Auch eine Schweizer Studie aus dem Jahr 2012 kam zu dem Ergebnis, dass hoch angesetzte CO<sub>2</sub>-Abgaben sowohl notwendig als auch wirtschaftlich vertretbar sind (Ecoplan, 2012, S. 14).

Folglich ist festzuhalten, dass die Internalisierung von Umweltkosten in Deutschland bereits in die Praxis umgesetzt wird und weitere Entwicklungen in diesem Bereich zu erwarten sind. Dabei stehen insbesondere Klimakosten (auch: CO<sub>2</sub>-Preise) im Fokus von Politik und Wirtschaft.

Beispielsweise fordert das Umweltbundesamt, dass die Umweltkosten konsequenter internalisiert werden, da diese den Verursachern bisher nur unzureichend angelastet werden. Zudem führt dieser Zustand zu einer Verzerrung der Wirtschaftlichkeit von umweltfreundlichen Technologien und Produktsystemen. Insbesondere wird darauf

hingewiesen, dass die Anrechnung von Umweltkosten im Bau- und Gebäudesektor zu einem Sinneswandel in Richtung umweltverträglichem Bauen und Betreiben führen könnte. (Umweltbundesamt, 2021a)

#### **4.1.2. Umweltkostenberechnung**

Die Berechnung von Umweltkosten dient in der Praxis über die CO<sub>2</sub>-Besteuerung hinaus auch der Rechtfertigung umwelt- und energiepolitischer Entscheidungen (Porsch et al., 2015, S. 6). Gemäß der Gemeinsamen Geschäftsordnung der Bundesministerien (GGO) gilt die Erfassung der entstehenden Kosten für Bürgerinnen und Bürger sowie für die Wirtschaft (Gesetzeserfüllungsaufwand) seit 2011 als verpflichtend (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2020, § 44; Porsch et al., 2015).

Somit hat sich die Berechnung von Umweltkosten auf politischer Ebene bereits etabliert und wird aktuell vornehmlich für Investitionsprojekte und Entscheidungen angewandt, welche von gesamtökonomischer Bedeutung sind. Darunter fallen beispielsweise große Investitionen im Bereich Verkehr und Energieversorgung. In Deutschland ist dabei insbesondere im Verkehrswegebau der Einbezug von Umweltkosten bereits seit langem etabliert. Dazu werden Kosten von Lärm, Abgasemissionen, Klimaschäden, Trennwirkungen und Unfällen berechnet. Im Gebäudebereich dagegen bestehen in Deutschland keine allgemein bekannten Methoden zum Einbezug von Umweltkosten, obwohl verschiedene Studien explizit auf das große Potential in diesem Sektor hinweisen (BMVBS, 2010, S. 10; Maibach et al., 2007, S. 5). Hierzu können die Nachbarländer Schweiz und Österreich in Bezug auf die Berechnung externer Kosten von Energieversorgungssystemen für Gebäude als Vorbilder dienen. (Maibach et al., 2007, S. 15–29)

In ISO 15686-5 zur Lebenszykluskostenrechnung von Gebäuden wird auf den Einbezug von externen Kosten und Umweltkosten hingewiesen. Die Norm empfiehlt nur Kosten in eine LCC einzubeziehen, die sich auch tatsächlich auf die Wirtschaftlichkeit des Projekts auswirken. Insbesondere wird darauf hingewiesen, dass eine Monetarisierung von Umweltbelastungen im Kontext einer Nachhaltigkeitsbewertung zu einer Doppelwertung führen kann. Eine Berücksichtigung von Umweltkosten als klar gekennzeichnete externe Kosten wird im Rahmen eines „whole life costings“, sprich einer Lebenszykluskostenanalyse im weiteren Sinne unter Einbezug der Erträge, in Betracht gezogen. Dabei wird ebenfalls auf die oben genannte ISO 21931-1 verwiesen. (ISO, 2017, S. 23–25)

Es kann zusammengefasst werden, dass Umweltkosten nach dem heutigen Stand der Technik in Deutschland

- in Form von CO<sub>2</sub>-Steuern zunehmend internalisiert werden,
- zur Bewertung (umwelt-)politischer Maßnahmen, wie großen Verkehrs- und Energieprojekten dienen und
- im Gebäudebereich trotz des hohen Potentials bisher in der Regel nicht in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen einfließen.

## 4.2. Stand der Forschung

In der Forschung finden sich seit den 90er Jahren Studien zu Kostensätzen für Umweltbelastungen. Insbesondere das EU-Forschungsprojekt ExternE mit dessen Folgeprojekten wie NEEDS, HEATCO oder NewExt und Untersuchungen im Verkehrssektor wie UNITE und INFRAS/ IWW sind an dieser Stelle zu nennen. (Umweltbundesamt, 2012, S. 12–14)

Die neue Veröffentlichung „Climate cost modelling“ des Umweltbundesamtes analysiert Ansätze zur Klimakostenmodellierung und gibt Anweisungen zur politischen Nutzung dieser (Oberpiller et al., 2021). Die Modellierung neuer Umweltkostensätze ist nicht Teil der vorliegenden Arbeit, wobei die Kenntnis einiger Grundlagen zur Anwendung existierender Kostensätze notwendig ist. Dazu werden im einleitenden Text von Kapitel 4 die Berechnungsansätze für Vermeidungs- und Schadenskosten gegenübergestellt.

Tekie und Lindblad bieten eine Übersicht ausgewählter Studien und Methoden zur Berechnung von Umweltkosten. Diese nutzen verschiedene räumliche Grenzen, Kostenansätze (Vermeidungs- bzw. Schadenskostenansatz) und Umweltbewertungsmethoden. Die Auswertung zeigt, dass Kostenwerte für verschiedene Bezugsebenen existieren. Folglich kann nicht jeder Kennwert auf jeder Ebene einer Ökobilanz angewandt werden. Abbildung 15 verdeutlicht die Ökobilanz- und Kostenebenen grafisch. So können Umweltkosten für die Emission einer spezifischen Substanz in  $\text{€}/\text{Menge}_{\text{emit. Substanz}}$ , z.B.  $\text{€}/\text{kg NO}_x$  angegeben werden. Dabei werden alle Vermeidungs- bzw. Schadenskosten zusammengefasst, die zur Kompensation der Umweltwirkung der jeweiligen Substanz notwendig sind. (Tekie & Lindblad, 2013)

Bezieht man dies exemplarisch auf die Emission von 1 kg NO<sub>x</sub> enthält der Kostensatz z.B. die Kosten für Gesundheitsschäden, Biodiversitätsverluste, Ernte- und



Materialschäden, die durch die Emission eines Kilogramms  $NO_x$  verursacht werden (Bünger & Matthey, 2020, S. 14).

Im Rahmen einer Gebäude-Ökobilanz können so die in der Sachbilanz ermittelten Emissionen direkt monetär bewertet werden. Alternativ werden in einigen Studien Kostenkennwerte für die sogenannten Mid-Point-Indikatoren angegeben. Die Mid-Point-Indikatorwerte bilden im Ablauf einer Ökobilanz den Output der Wirkungsabschätzung und aggregieren die Umweltwirkung verschiedener Emissionen in Wirkkategorien. Beispielsweise tragen der Ausstoß von  $CO_2$  und  $NO_x$  zum Treibhauseffekt bei und werden (deren Wirkungsausmaß entsprechend) im Mid-Point-Indikator „globales Treibhauspotenzial“ in der Einheit [kg  $CO_2$ -Äquivalent] zusammengefasst. Als dritte Variante, können Umweltkosten für End-Point-Indikatoren angegeben werden. End-Point-Indikatoren beschreiben Auswirkungen, welche von Betroffenen unmittelbar wahrgenommen werden können. Beispiele hierfür bilden Gesundheitsprobleme, Ernteverluste oder Schäden an Gebäuden. Die Umweltkosten der End-Point-Indikatoren dienen in einigen Studien auch als Basis für die Berechnung von Umweltkosten je Emission oder je Mid-Point-Indikator. (Tekie & Lindblad, 2013)

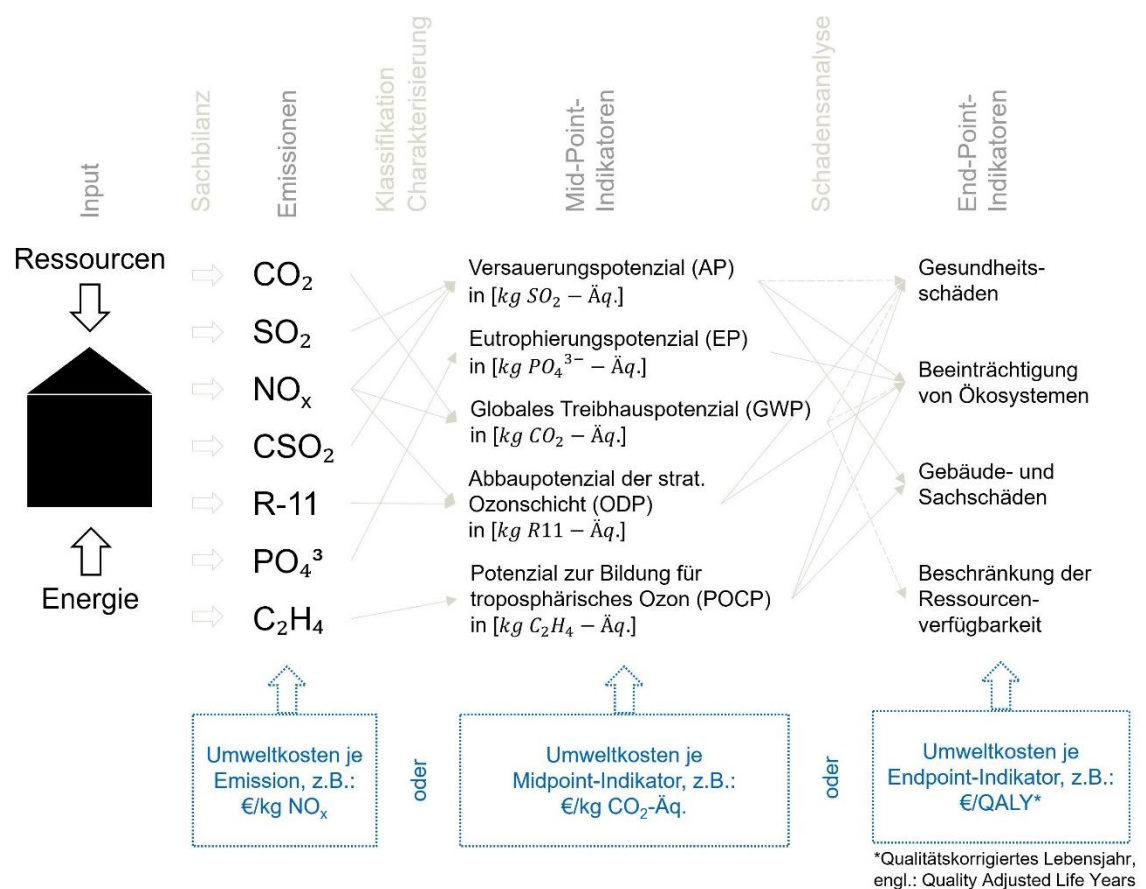


Abbildung 15: Arten von Umweltkostensätzen nach Bezugsebenen (Emission/ Mid-Point-/ End-Point-Indikator) nach eigener Darstellung

Die 2021 veröffentlichte DIN EN ISO 14008 enthält eine Aufzählung von Methoden zur monetären Bewertung von Umweltwirkungen. Darüber hinaus werden Hinweise zum Umgang mit bereits existierenden Umweltkostensätzen gegeben und das Vorgehen zur Anpassung des Basisjahrs und der Währung sowie Empfehlungen zur transparenten Dokumentation bereitgestellt.

Aber auch einschlägige Studien bieten Vorschläge zum methodischen Vorgehen und praxisrelevante Anwendungsbeispiele. Darunter sind Bünger & Matthey sowie Bertschmann et al. zu nennen (Bertschmann et al., 2020; Bünger & Matthey, 2018, S. 40–53). Insbesondere die Methodenkonvention 3.1 von Bünger & Matthey aus 2020 bietet umfassende, aktuelle Umweltkostensätze. Die angegebenen Kennwerte für Luftschadstoffemissionen sind dabei je emittierter Substanz [ $\text{€}/\text{Menge}_{\text{emit. Substanz}}$ ] ausgewiesen und teilweise nach End-Point-Indikatoren (Klimawirkung, Gesundheitsschäden, Biodiversitätsverluste, Ernteschäden, Materialschäden) unterteilt. Daneben sind auch Kostenwerte für spezifische Verursacher wie Strom- und Wärmeerzeugung, Personen- und Güterverkehr, Landwirtschaft und Baustoffe angegeben. (Bünger & Matthey, 2020)

Einige Studien weisen auf hohe Relevanz und großes Potenzial in der Berechnung von Umweltkosten und deren Internalisierung im Gebäudebereich hin. Es wird bestätigt, dass dies sowohl die Entscheidung zugunsten umweltverträglicher Maßnahmen stärken als auch von großer volkswirtschaftlicher Relevanz sein kann. In einer Veröffentlichung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zu externen Kosten im Hochbau wird darüber hinaus geschlussfolgert, dass die Einbindung der Umweltkostenberechnung in das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) sinnvoll ist. Außerdem wird eine Weiterentwicklung gefordert und Untersuchungen zur Bedeutung der Baukonstruktion als notwendig erachtet. (BMVBS, 2010, S. 10; Maibach et al., 2007, S. 5)

In oben genannter Studie werden sechs Beispielgebäude über 80 Jahre bilanziert, woraus sich ergibt, dass die Herstellungskosten bei internalisierten Umweltkosten im Durchschnitt 34,5 % höher liegen. (BMVBS, 2010, S. 9–10)

Auch Schneider-Marin und Lang analysieren sechs verschiedene Beispielgebäude über einen Bilanzzeitraum von 50 Jahren und zeigen, dass die Umweltkosten der Baukonstruktion 26 bis 37 % der Errichtungskosten bzw. 16 bis 20 % der Lebenszykluskosten entsprechen (Schneider-Marin & Lang, 2020, S. 1649).

## 5. Vergleichende Kostenanalysen

Dieses Kapitel widmet sich den Rahmenbedingungen der Lebenszykluskostenanalyse sowie Ökobilanz und dokumentiert ergänzend zu Kapitel 2 die getroffenen Annahmen und Systemgrenzen. Auch die maßgebenden Attribute des betrachteten Beispielobjekts „Montessori Schule“ werden beschrieben. In Abschnitt 5.3 werden die Zwischenergebnisse der Ökobilanz mittels ausgewählter Umweltkostensätze gewichtet.

### 5.1. Annahmen und Systemgrenzen

Die Lebenszykluskostenanalyse ist am Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) für Unterrichtsgebäude orientiert, deren Rahmenbedingungen Tabelle 4 auflistet.

**Tabelle 4: Rahmenbedingungen der Lebenszykluskostenanalyse in dieser Arbeit in Anlehnung an (BMUB, 2017b)**

Betrachtungszeitraum	50 Jahre
Lebenszyklusphasen	Herstellung (A1-5), Nutzung (B2, B4, B6, B7)
Einbezogene Kostengruppen	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ausgewählte Herstellungskosten nach DIN 276: KG 300 KG 400, ausgenommen KG 470</li> <li>2. Ausgewählte Nutzungskosten der DIN 18960: KG 311: Versorgung – Wasser KG 312-316: Versorgung – Öl, Gas, feste Brennstoffe, Fernwärme, Strom KG 321: Entsorgung- Abwasser KG 331-333: Unterhalts-, Glas- und Fassadenreinigung KG 352: Inspektion und Wartung der Baukonstruktion KG 353: Inspektion und Wartung der TGA KG 410: Instandsetzung der Baukonstruktion KG 420: Instandsetzung der TGA</li> </ol>
Einbezogene Berechnungen	<p>Bedarf an Endenergieträgern für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung, Kühlung, Beleuchtung und Hilfsenergie nach DIN 18599 (identisch für beide Varianten), Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen gemäß Steckbrief nach BNB (identisch für beide Varianten)</p>
Preisentwicklung	2 % jährliche Preissteigerung für Bau- und Dienstleistungen, 5 % jährliche Preissteigerung für Energie
Diskontierungszinssatz	1,50 %

Die Herstellungskosten (KG 300, 400) des Originalgebäudes aus Brettsperrholzmodulen werden durch die Firma LiWood zur Verfügung gestellt. Dabei ist zu beachten, dass nicht immer eine exakte Zuordnung der Kostendaten zu entsprechenden Kostengruppen der DIN 276 möglich war. Dadurch empfiehlt sich ein Vergleich der berechneten Lebenszykluskosten lediglich als Gesamtwert oder auf erster Gliederungsebene. Auch erfordert die Kooperation, dass die Kostenrechnungen im Holzmodulbau aus Datenschutzgründen der Firma LiWood als prozentuale Auswertungen angegeben werden.

Die Herstellungskosten des Zwillingsgebäudes aus mineralischen Baustoffen entstammen dem Kostenplaner 2021 des Baukosteninformationszentrums (BKI) für Förder- und Sonderschulen. Die Kostendaten der Nutzungsphase entsprechen den Ansätzen des BNB Steckbriefs (BMUB, 2017b, Anlage 1-3). Tabelle 5 fasst die Zuordnung der Datenquellen zusammen.

Tabelle 5: Einbezogene Kostengruppen und Datenquellen für die Lebenszykluskostenanalyse der vorliegenden Arbeit

<b>Baukosten gem. DIN 276</b>		<b>Quelle der Kostendaten</b>
KG 300	Bauwerk – Baukonstruktion	Mineralisch: Kostendaten zu Förder- & Sonderschulen (“BKI Kostenplaner,” 2021) Holzmodulbau: LiWood AG
KG 400	Bauwerk – Technische Anlagen	Mineralisch: Kostendaten zu Förder- & Sonderschulen (“BKI Kostenplaner,” 2021) Holzmodulbau: LiWood AG
<b>Nutzungskosten gem. DIN 18960</b>		
KG 311-316	Versorgung	(BMUB, 2017b, Anlage 3)
KG 321	Entsorgung – Abwasser	(BMUB, 2017b, Anlage 3)
KG 331-333	Unterhalts-, Glas- und Fassadenreinigung	(BMUB, 2017b, Anlage 1)
KG 352-353	Inspektion & Wartung der Baukonstruktion + TGA	(BMUB, 2017b, Anlage 2)
KG 410-420	Instandsetzung der Baukonstruktion + TGA	(BMUB, 2017b, Anlage 2)

Die erfassten Lebenszyklusphasen umfassen im Rahmen der LCC, wie in Tabelle 4 vermerkt und in Abbildung 6 des Kapitels 2 dargestellt, die Herstellungs- und Nutzungsphase. Die Entsorgungskosten der Gebäude wurden aufgrund mangelnder Daten nicht einbezogen. Eine belastbare Unterscheidung der Entsorgungskosten für mineralische

Baustoffe gegenüber Brettsperrholzmodulen bedürfte detaillierter Untersuchungen und ggf. der Kooperation mit Entsorgungsunternehmen. Dieser Aspekt geht über den Rahmen dieser Arbeit hinaus.

Des Weiteren liegt der Zeitpunkt, zu dem die Entsorgungskosten fällig werden, je nach Bilanzzeitraum in weiter Ferne. Aus diesem Grund können einerseits nur schwer konkrete, belastbare Kostensätze generiert werden, andererseits haben die Entsorgungskosten durch die Diskontierung nur reduzierten Einfluss auf die Gesamtkosten. (Enseling et al., 2015, S. 58)

Die Berechnung der Umweltwirkungen, die als Basis für die Abschätzung der Umweltkosten dient, wird entsprechend DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 durchgeführt und ebenfalls an die Anforderungen des BNB angelehnt. Die gewählten Rahmenbedingungen sind Tabelle 6 zu entnehmen. Welche Lebenszyklusphasen in die Berechnung eingeschlossen werden, wird unter Kapitel 2 „Forschungsgegenstand und Methodik“ in Abbildung 6 visualisiert.

**Tabelle 6: Rahmenbedingungen der Ökobilanz im Rahmen dieser Arbeit**

Betrachtungszeitraum	50 Jahre
Lebenszyklusphasen	Herstellung (A1-3), Nutzung (B4, B6), Entsorgung (C3, C4), separate Ausweisung des Informationsmoduls D
Ziel	Vergleichende Untersuchung zweier Konstruktionsvarianten des Projekts „Montessori Schule“ und Gewichtung der Ökobilanzergebnisse mit Umweltkostensätzen
Umweltindikatoren (Mid-Point)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Globales Treibhauspotenzial (GWP) [<math>kg CO_2 - \ddot{A}q.</math>]</li> <li>▪ Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP) [<math>kg R11 - \ddot{A}q.</math>]</li> <li>▪ Potenzial zur Bildung für troposphärisches Ozon (POCP) [<math>kg C_2H_4 - \ddot{A}q.</math>]</li> <li>▪ Versauerungspotenzial (AP) [<math>kg SO_2 - \ddot{A}q.</math>]</li> <li>▪ Eutrophierungspotenzial (EP) [<math>kg PO_4^{3-} - \ddot{A}q.</math>]</li> </ul>

Datenquelle	ÖKOBAUDAT 2021 II (ausschließliche Verwendung von Datensätzen entsprechend EN 15804+A1),  Ausgewählte EPDs entsprechend DIN EN 15804/ ISO 14025
Gesondert berechnete Lebenszyklusphasen	B4 „Erneuerung“: Berechnung entsprechend BNB (BMUB, 2017a) $\frac{\text{Lebensdauer}_{\text{Produkt}}}{\text{Bilanzzeitraum}} * \left( \sum (A1, A2, A3) + \sum (C3, C4) \right)$
Einbezogene Berechnungen	Bedarf an Endenergieträgern für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung, Kühlung, Beleuchtung und Hilfsenergie nach DIN 18599 (identisch für beide Varianten)

## 5.2. Beschreibung des Praxisprojekts

Das Projekt „Montessori Schule“ ist ein aktuelles Bauprojekt der LiWood AG und wird in Holzmodulbauweise aus Brettsper Holz realisiert. Es dient als Beispielobjekt dieser Arbeit und wird hinsichtlich seiner Lebenszyklus- und Umweltkosten analysiert. Abbildung 16, Abbildung 17 und Abbildung 18 vermitteln einen Eindruck vom Gebäude.



Abbildung 16: Rendering der "Montessori Schule" (Corestate Capital Group, 2021)

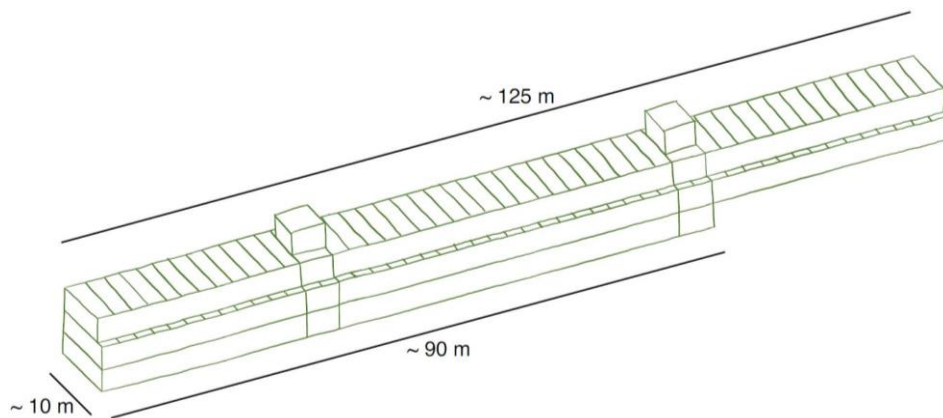


Abbildung 17: 3D-Skizze des Projekts "Montessori Schule" mit angedeutetem Modulraster und Maßen nach eigener Darstellung

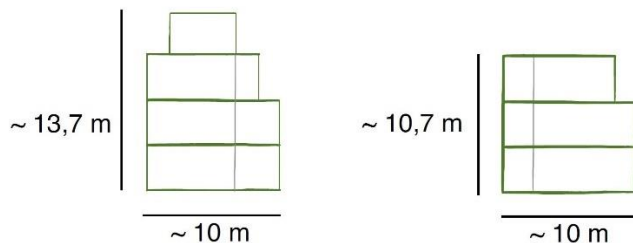


Abbildung 18: Schnitt-Skizzen des Projekts "Montessori Schule" am Treppenhaukern (links) bzw. im Standardquerschnitt (rechts) nach eigener Darstellung

Um einen Vergleich zwischen modularem Holzbau und konventionellen Bauweisen ziehen zu können, wird einerseits das Originalgebäude und andererseits ein fiktives Zwillingengebäude aus Stahlbeton bilanziert. Dabei bleiben die wesentlichen Flächen des Gebäudes gleich, lediglich die Wand- und Deckenstärken, die erforderlichen Dämmstoffdicken sowie der Fußbodenaufbau werden im Zuge der Ökobilanzierung an das Konstruktionssystem angepasst. Dabei dienen die U-Werte des originalen Holzmodulgebäudes als Referenzwert, um einen vergleichbaren Energiestandard zu erzielen. An der technischen Gebäudeausrüstung werden keine Änderungen zum Originalgebäude vorgenommen, da sich die Betrachtungen dieser Arbeit auf die Konstruktionsart konzentriert. Tabelle 7 fasst die Eckdaten der „Montessori Schule“ zusammen.

Tabelle 7: Eckdaten zum Analyseobjekt "Montessori Schule"

Projektname	Montessori Schule
Nutzung	Integrative Schule, Ganztagsbetreuung und Kinderhort nach dem Montessori-Konzept für bis zu 544 Kinder
Systemgrenze	Oberkante der Tiefgaragendecke/ -einfahrt (ausschließlich Kalkulation des Hochbaus ohne Fundamente, Keller und Außenanlagen)
Konstruktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Originalgebäude: Holzmodulbauweise aus Brettsperrholz, Holzfassade (Faserzementfassade an Treppenhauskernen)</li> <li>▪ Fiktiver Zwilling: Stahlbeton, Wärmedämmverbundsystem</li> </ul>
Flächen gem. DIN 277	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bruttogrundfläche (BGF): 3590 m<sup>2</sup></li> <li>▪ Nettoraumfläche (NRF): 2940 m<sup>2</sup></li> <li>▪ Nutzfläche (NUF): 2290 m<sup>2</sup></li> </ul>
Energiestandard	<p>KfW 55</p> <p>U-Werte:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>U_{\text{Außenwand}} \cong 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}</math></li> <li>▪ <math>U_{\text{oberste Geschossdecke}} \cong 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}</math></li> <li>▪ <math>U_{\text{Bodenplatte}} \cong 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}</math></li> </ul>
Energiebereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2 x Luft-Wasser-Wärmepumpe,</li> <li>▪ 260 m<sup>2</sup> Photovoltaikanlage zur Eigennutzung (keine Einspeisevergütung kalkuliert),</li> <li>▪ zusätzliche Endenergie: Strom-Mix Deutschland</li> <li>▪ Durchlauferhitzer an Wasserübergabestationen,</li> <li>▪ Flachheizkörper</li> </ul>
Abweichende Annahmen	Kiesauflast (kalkuliert in beiden Ökobilanzen der Konstruktionsvarianten) statt Dachgarten (tatsächlich ausgeführt)

Anhang B beinhaltet darüber hinaus einen ausführlichen Bauteilkatalog der im Zuge der Ökobilanzen kalkulierten Bauteile bzw. Baustoffe.



### 5.3. Berechnung der Umweltkosten

Nachdem unter Abschnitt 5.1 bereits die Rahmenbedingungen der durchgeführten Ökobilanz dokumentiert sind, widmet sich dieser Abschnitt den Ökobilanzergebnissen sowie deren monetärer Bewertung. Ergänzend wird an dieser Stelle auf die Ausführungen zur Methodik in Kapitel 2 hingewiesen. Das dort beschriebene methodische Vorgehen zur Berechnung der Umweltkosten auf Basis der Mid-Point-Indikatoren einer Ökobilanz wird angewandt.

Die Auswertung der potenziellen Umweltwirkungen auf Mid-Point-Ebene getrennt nach Lebenszyklusphasen kann Tabelle 8 (Holzmodulbau) bzw. Tabelle 9 (Stahlbetonkonstruktion) entnommen werden.

**Tabelle 8: Ergebnisse der Ökobilanz der "Montessori Schule" in der Konstruktionsvariante "Holzmodulbau"**

	Einheit	A1-A3	B4	B6	C3	C4	D
<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	-8,07E+05	4,56E+05	1,58E+06	1,53E+06	2,11E+04	-9,90E+05
<b>ODP</b>	kg R11-Äq.	1,28E-02	7,17E-03	1,71E-07	4,05E-08	5,70E-05	-6,82E-05
<b>POCP</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq.	3,14E+02	1,41E+02	1,77E+02	2,35E+00	3,58E+00	-1,04E+02
<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	2,28E+03	1,49E+03	2,16E+03	2,59E+01	4,53E+01	-1,31E+03
<b>EP</b>	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	4,00E+02	1,65E+02	4,26E+02	4,73E+00	6,41E+00	-2,04E+02

**Tabelle 9: Ergebnisse der Ökobilanz der "Montessori Schule" in der Konstruktionsvariante "Stahlbeton"**

	Einheit	A1-A3	B4	B6	C3	C4	D
<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	7,97E+05	4,96E+05	1,58E+06	9,71E+04	2,61E+04	-6,22E+05
<b>ODP</b>	kg R11-Äq.	2,23E-02	1,05E-02	1,71E-07	8,83E-08	5,70E-08	-2,62E-06
<b>POCP</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq.	2,63E+02	1,57E+02	1,77E+02	3,19E+00	4,57E+00	-1,05E+02
<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	2,25E+03	1,83E+03	2,16E+03	3,44E+01	5,70E+01	-1,12E+03
<b>EP</b>	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	3,09E+02	1,85E+02	4,26E+02	6,52E+00	8,48E+00	-1,42E+02

Diese Ergebnisse werden mit ausgewählten Umweltkostensätzen einschlägiger Studien multipliziert und zu einem Gesamtwert aufsummiert. Die gewählten Kostensätze werden

in Tabelle 10 aufgelistet. Einerseits bilden die von Schneider-Marin und Lang aus einer Vielzahl existierender Studien gesammelten Kostensätze ein Maximum ab. Andererseits werden die Vermeidungskosten der Arbeitsgruppe Sustainability Impact Metrics (ein Spin-off der Technischen Universität Delft) als Minimum angesetzt. Der Berechnungsansatz der sog. Vermeidungskosten dient, wie unter Kapitel 4 erläutert, zur Abschätzung der unteren Grenze tatsächlicher Umweltkosten. Im Generellen ist die Auswahl existierender Kostensätze auf Studien beschränkt, welche sich auf sog. Mid-Point-Indikatoren beziehen, anstatt die Umweltkosten einzelner Substanzen auszuweisen. Die detaillierten Sachbilanzdaten bleiben bei der Verwendung der Datenbank ÖKOBAUDAT unbekannt, sodass nicht eruiert werden kann, welche einzelnen Substanzen zu den Wirkindikatoren beitragen. Auch wenn die Ergebnisse einer Ökobilanzierung mittels ÖKOBAUDAT in Einheitsäquivalenten zusammengefasst sind, eignet sich der Kostensatz der entsprechenden Substanz nicht immer für die Abbildung der Umweltkosten eines Mid-Point-Indikators. Um Mehrfachgewichtungen zu vermeiden, sind folglich Datensätze zu wählen, die sich explizit auf den entsprechenden Mid-Point-Indikator beziehen und optimalerweise einer einzelnen Studie entstammen. Dies ist von Bedeutung, da innerhalb einer Studie in der Regel konstante räumliche und zeitliche Rahmenbedingungen angenommen werden und die Kostensätze der Mid-Point-Indikatoren zur Vermeidung von Doppelgewichtungen aufeinander abgestimmt werden.

Dabei kann eine Allokation verschiedener Kosten vorgenommen sein, welche bei einer Kombination von Datensätzen verschiedener Studien verlorengehen und zu Inkonsistenzen führen kann. Hierfür kann die Studie der Sustainability Impact Metrics als Beispiel herangezogen werden. Diese verweist bei den Indikatoren AP, EP und POCP auf ein Risiko für Mehrfachzählungen.  $\text{NH}_3$ - und  $\text{NO}_2$ -Emissionen in die Luft können beispielsweise Einfluss auf die Mid-Point-Indikatoren EP und AP haben. Im Rahmen der Studie werden die Umweltwirkungen beider Substanzen dem Indikator EP zugeordnet. Die Freisetzung von  $\text{NO}_x$  erhöht sowohl das Überdüngungspotenzial (EP) als auch die Bildung troposphärischen Ozons (POCP). In diesem Fall ordnet Sustainability Impact Metrics die Vermeidungskosten der Substanz anteilig zu. (Sustainability Impact Metrics, 2021).

Des Weiteren ist für die Berechnung der Umweltkosten der Nutzungsphase des Gebäudes (B4, B6) ein Diskontierungssatz zu wählen. Dies wird auch in DIN EN ISO 14008 gefordert (DIN, 2021). Für die vorliegende Berechnung der Umweltkosten der „Montessori Schule“ wird ein Diskontierungsfaktor von 0 % gewählt. Dies geschieht unter dem Argument, Schäden zukünftiger Generationen mit gleicher Gewichtung in die Bilanz

einfließen zu lassen wie Schäden heutiger Generationen. Unter dem Grundsatz der Nachhaltigkeit ist die Wohlfahrt der Menschen heute und in Zukunft mit gleicher Priorität zu bewerten (The World Commission on Environment and Development, 1987). Es wird davon ausgegangen, dass sich zukünftig potenziell höherer Wohlstand, welcher den Wert von Kosten, die in heutiger Währung und zeitlicher Dimension berechnet werden, in Zukunft mindern könnte, durch andere Effekte aufgehoben wird.

So zeigt eine aktuelle Studie von Kikstra et al., dass der Klimawandel das Wirtschaftswachstum auf lange Sicht wesentlich stärker beeinflusst als oftmals angenommen und das Wirtschaftswachstum hemmt. Die Umweltkosten werden unter Berücksichtigung dieser langfristigen ökonomischen Effekte auf bis zu 2800 €/ t CO<sub>2</sub> geschätzt. (Eichhorn, 2021; Kikstra et al., 2021)

**Tabelle 10: Umweltkostensätze zur Monetarisierung der berechneten Umweltwirkungen im Rahmen dieser Arbeit**

<b>Wirkindikator (Mid-Point)</b>	<b>Einheit</b>	<b>Maximale Umweltkosten</b> (Schneider-Marin & Lang, 2020)	<b>Minimale Umweltkosten</b> (Sustainability Impact Metrics, 2021)
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,68 €/ kg CO <sub>2</sub> -Äq.	0,116 €/ kg CO <sub>2</sub> -Äq.
Ozonschichtabbaupotenzial (ODP)	kg R11-Äq.	30,00 €/ kg R11-Äq.	- (Keine Angabe)
Ozonbildungspotenzial (POCP)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq.	10,02 €/ kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq.	9,08 €/ kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äq.
Versauerungspotenzial (AP)	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	15,04 €/ kg SO <sub>2</sub> -Äq.	8,75 €/ kg SO <sub>2</sub> -Äq.
Überdüngungspotenzial (EP)	kg PO <sub>4</sub> -Äq.	18,52 €/ kg PO <sub>4</sub> -Äq.	4,70 €/ kg PO <sub>4</sub> -Äq.

Die Ergebnisse der monetären Gewichtung werden im nächsten Kapitel graphisch dargestellt. Welche Auswirkung die gewählte Unterscheidung maximaler gegenüber minimaler Umweltkostensätze auf Gebäudeebene hat, wird ebenfalls an späterer Stelle ausgewertet.

## 6. Ergebnisse

Nachdem sowohl das Vorgehen im Rahmen der Lebenszyklus- und Umweltkostenanalyse (Kapitel 2 und 5) als auch die Grundlagen zum Verständnis der betrachteten Holzmodulbauweise (Kapitel 3) sowie der Umweltkosten (Kapitel 4) vermittelt wurden, werden nun die Ergebnisse der Analysen ausgewertet. Zunächst werden die Herstellungs- und Nutzungskosten prozentual gegenübergestellt. Im Anschluss erfolgt eine detaillierte Auswertung der berechneten Umweltkosten des Holzmodulbaus sowie der Stahlbetonkonstruktion.

### 6.1. Lebenszykluskosten

Die Lebenszykluskosten werden an dieser Stelle ausschließlich in kumulierten Prozentwerten angegeben, um die Wettbewerbsfähigkeit des Kooperationspartners LiWood AG nicht zu gefährden. Darüber hinaus ist ein detaillierter Vergleich der Kosten auf tieferen Kostengruppenebenen nicht als sinnvoll anzusehen, da die Herstellungskosten der Firma LiWood nicht immer eindeutig den Kostengruppen der DIN 276 zugeordnet werden können und so Verschiebungen zwischen den Kostengruppen entstehen können.

Abbildung 19 visualisiert die Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten der Konstruktionsvarianten Holzmodulbau und Massivbau, welche sich jeweils aus den Herstellungs- und Nutzungskosten zusammensetzen. Dabei werden für den konventionellen Massivbau drei verschiedene Kostenstufen angewandt. Der BKI Kostenplaner, welcher Quelle der Herstellungskosten im Massivbau ist, bietet einen Minimal-, einen Mittel- und einen Maximalwert an. Je nach Vergleichswert entsprechen die LCC des Holzmodulbaus 100, 111 bzw. 122 % der Kosten für die Massivbauausführung. Den Erfahrungswerten der Firma LiWood entsprechend bilden sich auch 4 bis 46 % höhere Herstellungskosten gegenüber konkurrierenden Anbietern im konventionellen Massivbau ab. Bei Vergaben nach dem reinen Preiskriterium würde der Zuschlag demnach nicht an das Holzmodulbauunternehmen gehen.

Wie die Auswertung zeigt, gleichen die LCC des Holzmodulbaus in etwa dem oberen Kostenbereich im Massivbau. Dabei ist jedoch anzunehmen, dass einige der Förder- und Sonderschulen, welche in die Kostendaten des BKI einfließen, über weitaus mehr

technische Gebäudeausrüstung verfügen als das Beispielobjekt dieser Arbeit. Die „Montessori Schule“ ist ohne mechanische Lüftungsanlagen geplant, um den Wünschen des späteren Nutzers zu entsprechen. Aus diesem Grund fallen die Herstellungskosten in bestimmten Positionen der KG 400 im Holzmodulbau geringer aus und verursachen geringere Wartungs- und Instandhaltungskosten. Dem gegenüberzustellen ist die Tatsache, dass für die Berechnung der Nutzungskosten beider Konstruktionsvarianten der gleiche Endenergiebedarf angesetzt wurde. Die potenzielle mechanische Lüftung des Massivbaus dürfte jedoch einen höheren Energiebedarf notwendig machen. Diese Verschiebungen sind im Rahmen eines Vergleichs zu beachten. Darüber hinaus ist die „Montessori Schule“ barrierefrei geplant.

Diese Besonderheit schlägt sich ebenfalls in den Herstellungskosten nieder. Als Vergleich können die Untersuchungen der Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen aus dem Jahr 2014 herangezogen werden. Dort werden die Mehrkosten für Barrierefreiheit im Wohnungsbau auf durchschnittlich  $242 \text{ €} / \text{m}^2_{\text{Wohnfläche}}$  geschätzt. Auch der hohe Energiestandard der „Montessori Schule“ entsprechend KfW 55 bildet einen Unterschied zu den im BKI-Kostenplaner erfassten Gebäuden ab. Hier werden die Mehrkosten im Wohnungsbau auf rund  $135 \text{ €} / \text{m}^2_{\text{Wohnfläche}}$  dotiert. (Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen, 2014, S. 24–25)

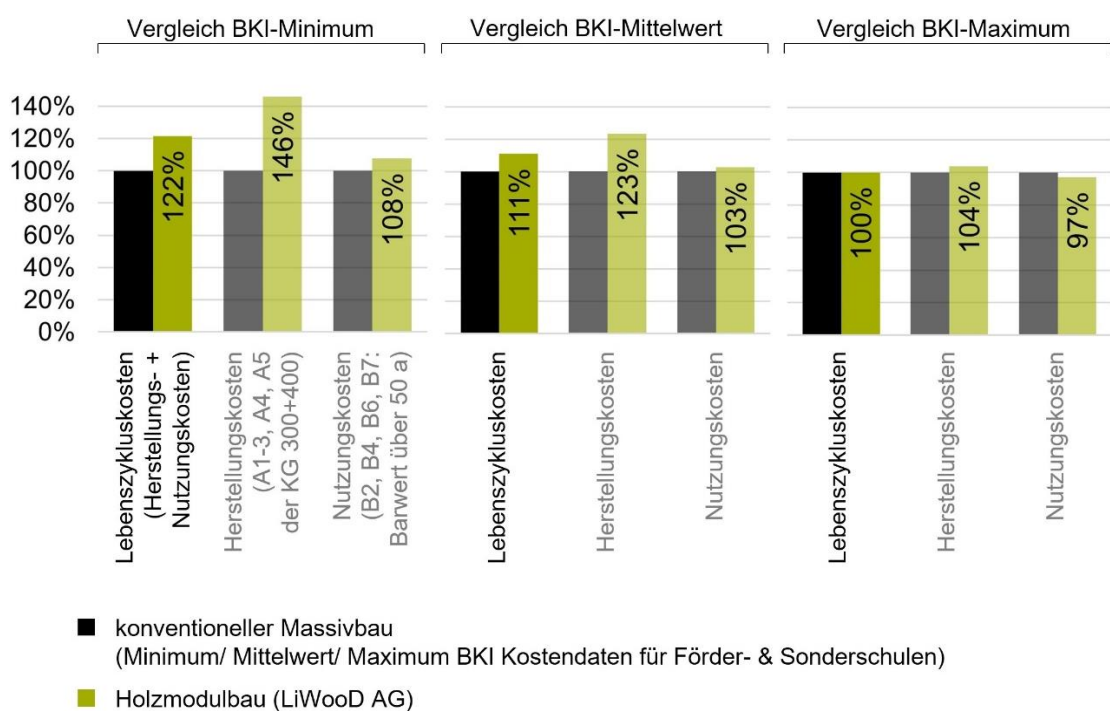


Abbildung 19: Gegenüberstellung der Lebenszyklus-, Herstellungs- und Nutzungskosten der Konstruktionsvarianten Holzmodulbau und Massivbau nach eigener Darstellung

Mit Auswertung der Abbildung 19 kann ein Teil der ersten Forschungsfrage (siehe Kapitel 2) beantwortet werden:

*Die „Montessori Schule“ in Holzmodulbauweise weist höhere Lebenszykluskosten auf als ein vergleichbares Gebäude in konventioneller Massivbauweise aus mineralischen Baustoffen, wenn von geringen oder mittleren Kosten im Massivbau ausgegangen wird. In diesen Fällen liegen die LCC des Holzmodulbaus 22 % (minimale BKI-Kostensätze) bzw. 11 % (Mittelwert BKI-Kostensätze) höher. Die Lebenszykluskosten eines Massivbaus mit hohen Herstellungskosten (maximale Kostensätze nach BKI) entsprechen in etwa den Lebenszykluskosten des Holzmodulgebäudes „Montessori Schule“.*

## 6.2. Umweltkosten

Im Folgenden werden die Umweltkosten (EC – engl.: environmental costs) des Projekts „Montessori Schule“ grafisch ausgewertet und die Ergebnisse der Konstruktionsvarianten Holzmodulbau und Stahlbeton verglichen. Die Ergebnisse der Ökobilanzierung sind Abschnitt 5.3 und insbesondere Tabelle 8 und Tabelle 9 zu entnehmen. Diese dienen als Zwischenschritt zur Berechnung der Umweltkosten.

Abbildung 20 zeigt zunächst die berechneten EC in [ $\text{€}/\text{m}^2_{BGF}$ ] aufgegliedert nach den einbezogenen Mid-Point-Indikatoren. Es werden die EC mit minimalen Kostensätzen nach Sustainability Impact Metrics und die maximalen EC gewichtet gemäß Schneider-Marin und Lang verglichen. Die verwendeten Kostensätze in [ $\text{€}/\text{Einheits} - \text{Äq.}$ ] sind unter Abschnitt 5.3 in Tabelle 10 dokumentiert.

Die Auswertung in Abbildung 20 zeigt, dass insbesondere die Wahl des Kostensatzes für „Globales Treibhauspotenzial“ (GWP) von Bedeutung ist. Auf diesen Indikator entfallen rund 95 % aller EC bei Betrachtung der maximalen Umweltkosten (i.e.  $EC_{\max}$ ) und 84 % im Minimalfall (i.e.  $EC_{\min}$ ). Darauf folgen nach Anteilen die EC für das Versauerungspotenzial (AP) mit rund 4,5 % $_{EC_{\max}}$  bzw. 13,5 % $_{EC_{\min}}$  in beiden Konstruktionen. POCP besitzt unter Anwendung der minimalen Kostensätze 1,3 % $_{EC_{\min}}$  Anteil am Massivbau und 1,5 % $_{EC_{\min}}$  Anteil an den gesamten EC des Holzmodulgebäudes, während dessen Anteil im Fall  $EC_{\max}$  gegen Null geht. Die Kosten des Eutrophierungspotenzials (EP) tragen mit 0,8 % $_{EC_{\max}}$  bzw. 1,1 % $_{EC_{\min}}$  zu den Umweltkosten des Stahlbetongebäudes sowie mit 0,9 % $_{EC_{\max}}$  bzw. 1,2 % $_{EC_{\min}}$  zum Holzmodulbau bei. Die Umweltkosten des Wirkindikators ODP sind vernachlässigbar gering.

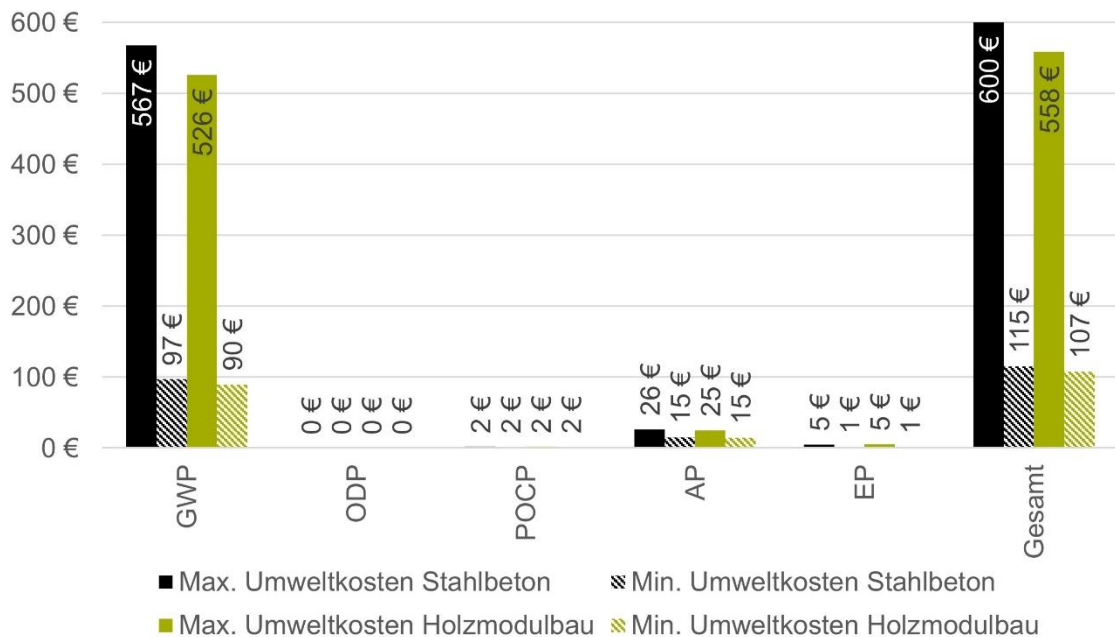


Abbildung 20: Umweltkosten über den gesamten Lebenszyklus (A1-3, B4, B6, C3-4) der „Montessori Schule“ nach Mid-Point-Indikatoren sowie Gegenüberstellung der minimalen und maximalen Kostensätze nach eigener Darstellung

Es ist eine deutliche Variation in den Gesamtumweltkosten durch die Verwendung geringerer oder höherer Umweltkostensätze zu erkennen. Die EC, welche auf Basis der Vermeidungskostensätze nach Sustainability Impact Metrics berechnet werden, entsprechen lediglich 19 % der maximalen EC. Für die weiteren Auswertungen werden die Ergebnisse der maximalen Umweltkostensätze verwendet, da diese insbesondere hinsichtlich des Wertes für globales Erwärmungspotenzial aus ökologischer Sicht realistischer erachtet werden. In der Studie von Schneider-Marin und Lang wurde dieser Kostenkennwert gemäß der Methodenkonvention 3.1 des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2020 gewählt. Dieser Wert basiert auf dem Prinzip des Schadenskostenansatzes und bildet die aktuelle Situation für Deutschland in €<sub>2020</sub> ab.

Die EC der Massivbauvariante liegen über den gesamten Lebenszyklus (A1-3, B4, B6, C3-4) rund 150.000 € über den EC des Holzmodulbaus. Dies entspricht rund 7 % höheren EC. Die nachfolgende Abbildung zeigt in Verbindung mit Tabelle 11 die berechneten Umweltkosten je  $m^2_{BGF}$  aufgliedert nach Lebenszyklusphasen und Konstruktionsart. Für den Holzmodulbau ergeben sich über den Lebenszyklus (A1-3, B4, B6, C3-4) Umweltkosten in Höhe von  $558 \text{ €/}m^2_{BGF}$ , während der Massivbau mit  $600 \text{ €/}m^2_{BGF}$  dotiert wird. Bei beiden Varianten haben die EC des Endenergiebedarfs über 50 Jahre (Phase B6) den höchsten Anteil (52 % im Massivbau, 56 % im Holzmodulbau). Da der gleiche Endenergieverbrauch, die gleiche technische Gebäudeausrüstung sowie der gleiche

Energiestandard für beide Konstruktionen angenommen werden, liegen die Umweltkosten des Betriebs mit  $311 \text{ €/m}^2_{BGF}$  gleichauf. Die Phase B6 wird aus diesem Grund in den weiteren Vergleichen der Konstruktionsvarianten nicht mehr explizit betrachtet.

Darüber hinaus wird die ÖKOBAUDAT-spezifische Verteilung des GWPs bei Holzbaustoffen deutlich. Die ÖKOBAUDAT gewährt Gutschriften für die Einspeicherung atmosphärischen Kohlendioxids während des Bauwachstums in Phase A1 (Rohstoffbereitstellung) und verzeichnet das Freiwerden der gleichen Menge CO<sub>2</sub> im Rahmen der Phase C3 (Abfallbehandlung). Damit besitzt der Holzmodulbau in der Herstellungsphase einen „Kredit“ an Umweltkosten, welcher erst am Ende des Lebenswegs im Verbrennungs- bzw. Verrottungsprozess aufgewogen wird. Andere Ökobilanzdatenbanken rechnen diese CO<sub>2</sub>-Speicherung nicht in die Herstellungsphase ein, sodass die Auswertung der EC wesentlich anders verteilt wäre. Die Auswertung mit ÖKOBAUDAT-Datensätzen könnte sich damit eignen, um die monetären Vorteile einer CO<sub>2</sub>-Speicherung zu berechnen, welche im Rahmen dieser Untersuchungen nicht erfasst werden konnten. Wie in Abschnitt 3.3.1 ausgeführt, bietet die langfristige Speicherung von CO<sub>2</sub> ökologische Vorteile und trägt aktiv zum Klimaschutz bei.

Die Informationen in Phase D umfassen einige der Vorteile, die über die Systemgrenze des Gebäudelebenszyklus hinausgehen. Darunter fallen beispielsweise die Substitution fossiler Brennstoffe durch thermische Verwertung erneuerbarer Baustoffe mit Brennwert. Unter Einbezug dieser Phase zeigen sich die Vorteile der Massivholzbauweise wesentlich deutlicher. Die EC reduzieren sich unter Einbezug der Phase D im Holzmodulbau um  $194 \text{ €/m}^2_{BGF}$  (entspricht -35 %) auf  $364 \text{ €/m}^2_{BGF}$ . Auch im Massivbau bringt Phase D einen Kostenvorteil von  $-124 \text{ €/m}^2_{BGF}$  (entspricht -21 %) und reduziert die Gesamtumweltkosten auf  $477 \text{ €/m}^2_{BGF}$ .



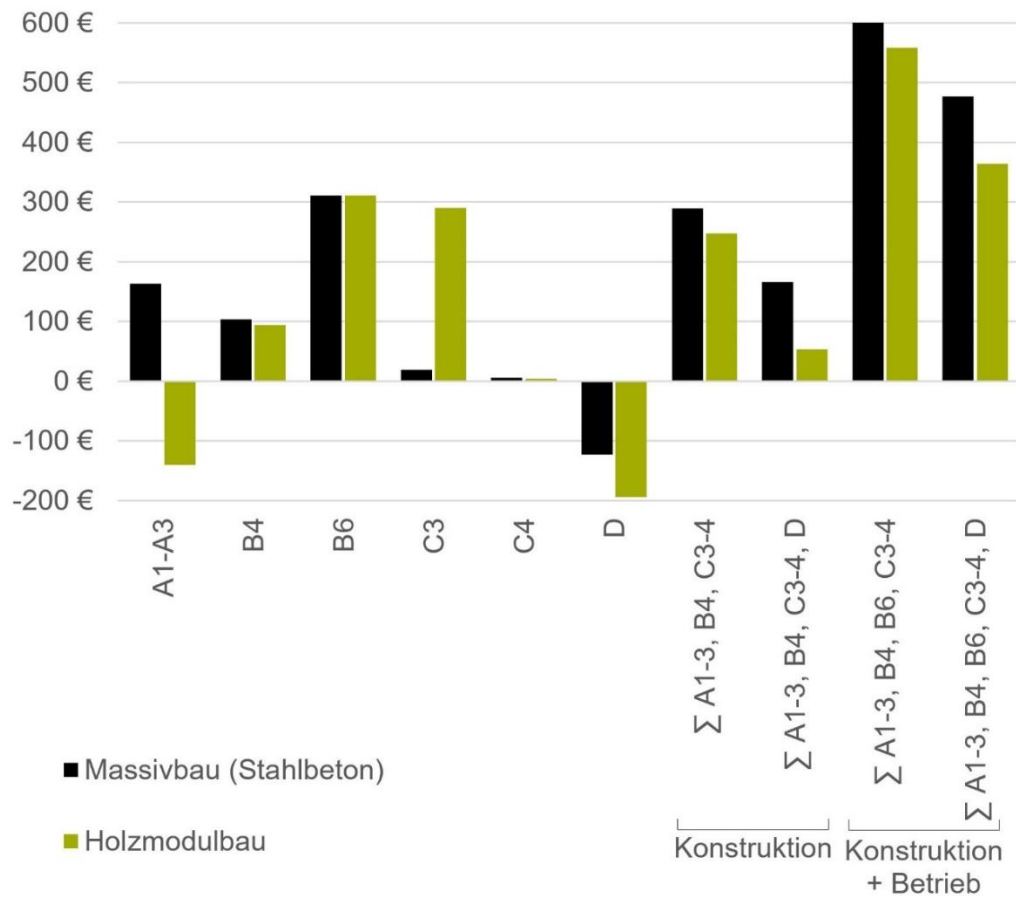


Abbildung 21: Auswertung der Umweltkosten in [€/m²BGF] je Lebenszyklusphase nach eigener Darstellung

Die Zahlenwerte zu Abbildung 21 können der nachfolgenden Tabelle 11 entnommen werden. Die Beträge werden kaufmännisch auf ganze Euro gerundet, da es sich um eine Schätzung der Umweltkosten handelt und die Angabe von Centbeträgen eine nicht abbildbare Genauigkeit suggerieren würde. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf kleinere Rundungsungenauigkeiten hingewiesen.

Tabelle 11: Umweltkosten in [€/m<sup>2</sup>BGF] je Lebenszyklusphase zu Abbildung 21

Lebenszyklusphase	Stahlbeton	Holzmodulbau
A1-A3	163 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>	-140 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>
B4	103 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>	94 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>
B6	311 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>	311 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>
C3	19 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>	290 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>
C4	5 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>	4 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>
D	-124 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>	-194 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>
Σ (A1-3, B4, C3-4)	290 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>	247 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>
Σ (A1-3, B4, C3-4, D)	166 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>	53 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>
Σ (A1-3, B4, B6, C3-4)	600 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>	558 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>
Σ (A1-3, B4, B6, C3-4, D)	477 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>	364 €/m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>

Werden die EC des Endenergiebedarfs (Phase B6) aufgrund gleichen Wertes für beide Konstruktionen aus der Betrachtung ausgenommen und Phase D zur Abbildung der Vorteile nachwachsender Rohstoffe einbezogen, so bietet der Holzmodulbau einen Umweltkostenvorteil von 113 €/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> gegenüber der konventionellen Konstruktion aus Stahlbeton. Die EC des Holzmodulbaus betragen über die Summe der Phasen A1-3, B4, C3-4 und D rund 53 €/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> während der Massivbau 166 €/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> verursacht.

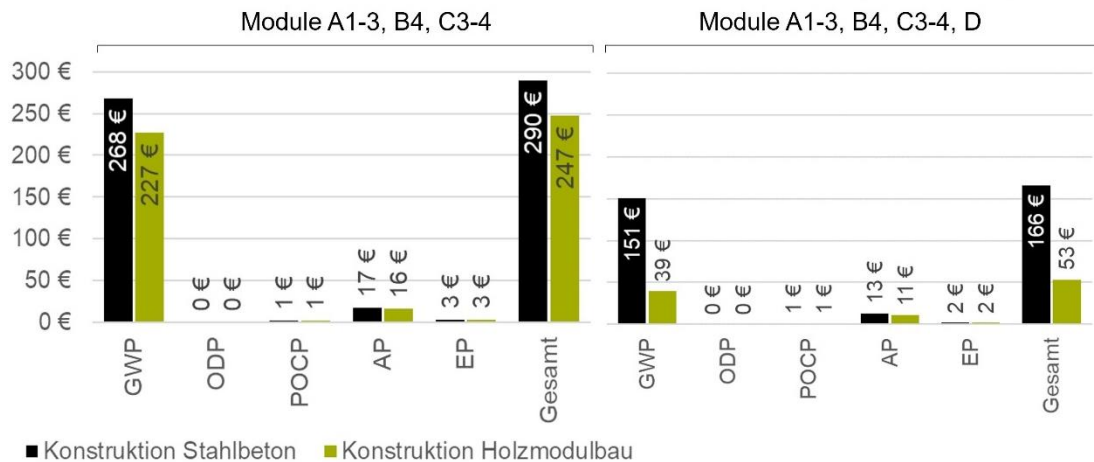


Abbildung 22: Umweltkosten in [€/m²BGF] der Konstruktionsvarianten ohne EC des Endenergiebedarfs (Phase B6) nach eigener Darstellung

Wird Phase D nicht einbezogen, zeigen sich für beide Konstruktionen hohe Umweltkosten. Dabei fallen die Holzmodulbau-EC lediglich  $42 \text{ €/m}^2_{BGF}$  geringer aus als die EC der Stahlbetonvariante.

Bei theoretischer Internalisierung der berechneten maximalen Umweltkosten ohne Gutschriften der Phase D steigen die Kosten der Baukonstruktion im Massivbau um rund 19 % und die Lebenszykluskosten inklusive des Endenergiebedarfs im Betrieb um etwa 16 %. Im Holzmodulbau steigen sowohl die Kosten der Baukonstruktion als auch die gesamten LCC um ca. 13 % an.

Um aufzuzeigen, welche Positionen besonders hohe Umweltkosten verursachen, schlüsselt Abbildung 23 diese nach den wesentlichen Baustoff-/ Bauteilgruppen auf. Es zeigt sich, dass die Technischen Anlagen (KG 400), wie bereits beschrieben, für beide Konstruktionsvarianten identisch angenommen werden und  $93 \text{ €/m}^2_{BGF}$  beitragen. Auch die Anzahl der Fenster und Türen bleiben für beide Varianten unverändert und bilden  $37 \text{ €/m}^2_{BGF}$  ab. Unter die Kategorie „Sonstige KG 300“ fallen sämtliche Innenausbauten sowie der Dachaufbau und die Dämmung der Bodenplatte. Den wesentlichen Unterschied zwischen den Konstruktionsarten bildet an dieser Stelle der Boden-aufbau. Während die Bodenbeläge identisch bleiben, wird das Stahlbetongebäude konventionell mit Zementestrich ausgeführt anstatt mit Trockenestrich wie im Holzmodulbau. Zu beachten ist, dass keine Ökobilanzdatensätze für die im Holzmodulbau eingebrachte Schüttung zur Gewährleistung des Schallschutzes existieren. Wie in Anhang B dokumentiert, kann diese Position nicht bilanziert werden. In der Kategorie „Sonstiges

KG 300“ ist im Holzmodulbau folglich von einer Unterschätzung der Umweltkosten auszugehen.

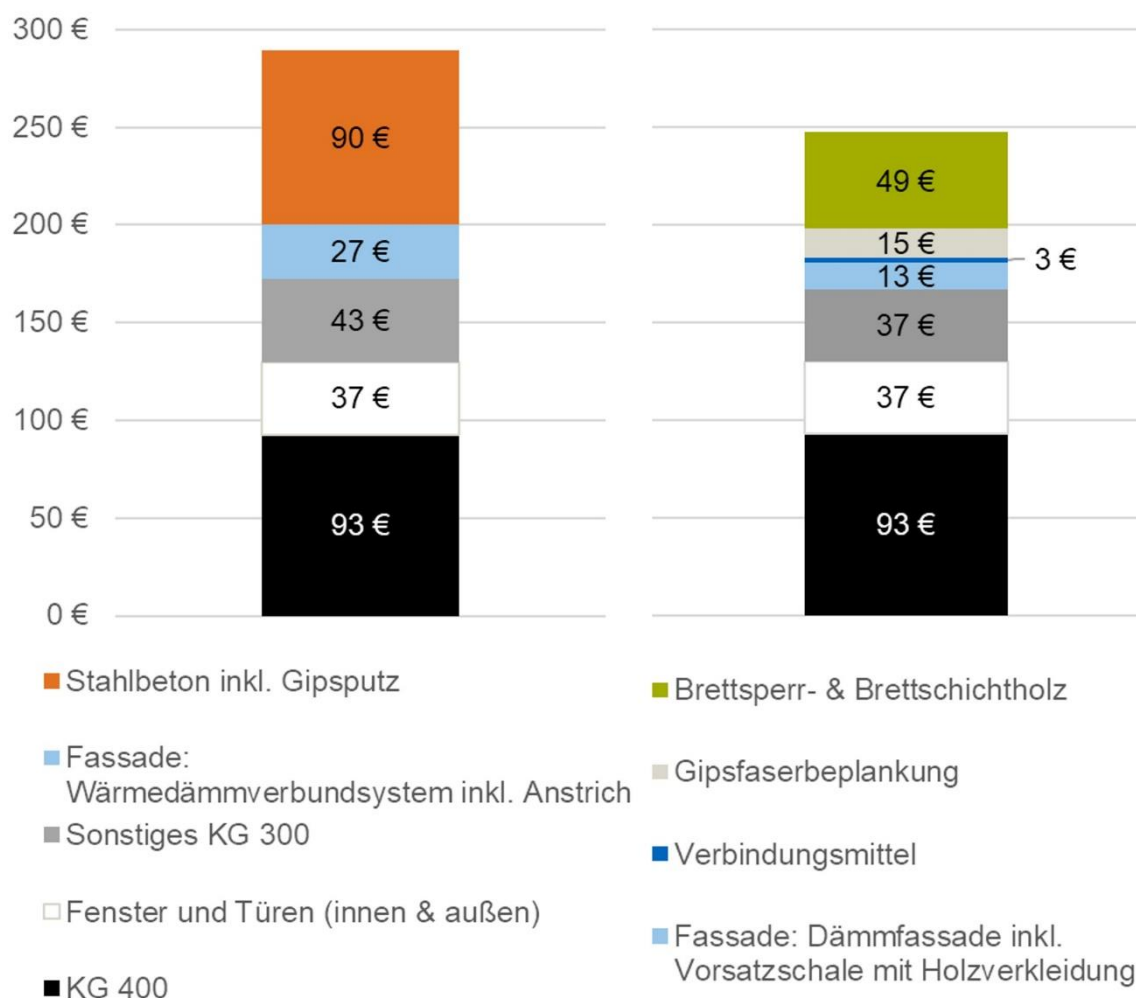


Abbildung 23: Umweltkosten in [€/m²BGF] über die Lebenszyklusphasen A1-3, B4 und C3-4 aufgeschlüsselt nach wesentlichen Baustoffgruppen nach eigener Darstellung

Wie Abbildung 1 Abbildung 23 zeigt, stammt eine erkennbare Umweltkostensparnis im Holzmodulbau aus der Holzfassade gegenüber dem Wärmedämmverbundsystem des Massivbaus ( $13 \text{ statt } 27 \text{ €/m}^2_{BGF}$ ). Darüber hinaus verursacht die Holzkonstruktion der Decken, Wände und Böden inkl. Brandschutzbekleidung knapp 29 % weniger EC als der Stahlbeton in gleicher Funktion.

Zur Minimierung der Umweltkosten im konstruktiven Bereich des Holzmodulbaus kann die Brandschutzkapselung aus Gipsfaserplatten theoretisch durch Lehmbauplatten ersetzt werden. Durch diese Baustoffoptimierung würden  $14,48 \text{ €/m}^2_{BGF}$  an

Umweltkosten eingespart. Es ist davon auszugehen, dass sich durch diese Anpassung auch die Herstellungskosten erhöhen.

Um Fehlinterpretationen zu Lasten nachwachsender Rohstoffe zu vermeiden, zeigt Abbildung 24 die Auswertung getrennt nach Baustoff-/ Bauteilgruppen unter Berücksichtigung der Phase D. Auf diese Weise zeigt sich deutlich der Mehrwert nachwachsender Rohstoffe. So reduzieren sich die Umweltkosten der Holzfassade von 13 auf  $7 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$  und die massiven Decken-, Wand- und Bodenbauteile verursachen einen Umweltkostenkredit von  $-54 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$ , welcher weiterhin mit den EC der Gipsfaser-Beplankung in Höhe von  $15 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$  belastet wird.

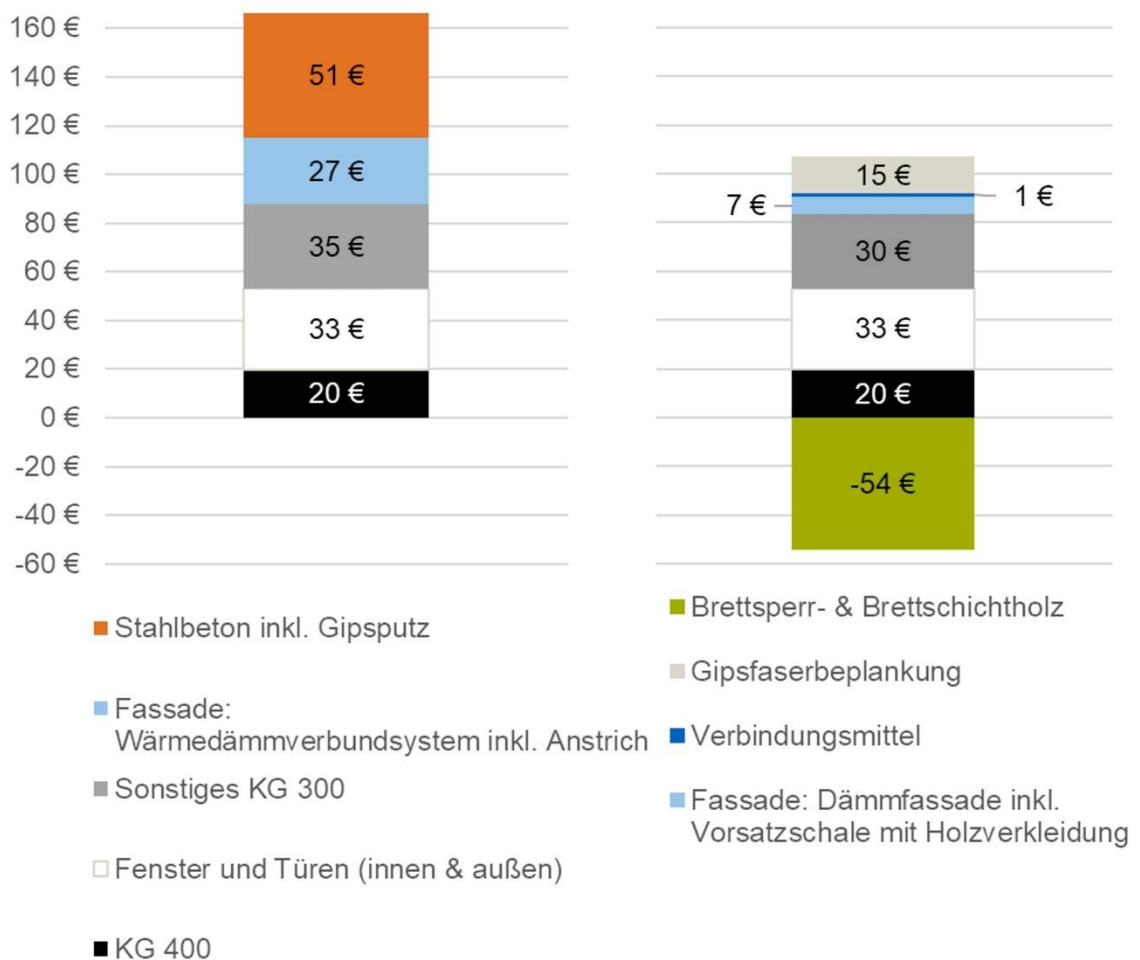


Abbildung 24: Umweltkosten in [€/m²BGF] über die Lebenszyklusphasen A1-3, B4, C3-4 und D aufgeschlüsselt nach wesentlichen Baustoffgruppen nach eigener Darstellung

Zusammenfassend kann nach diesen Auswertungen der zweite Teil der ersten Forschungsfrage (siehe Kapitel 2) beantwortet werden:

*Ein Gebäude in Holzmodulbauweise weist höhere Lebenszykluskosten auf als ein Gebäude in konventioneller Massivbauweise aus mineralischen Baustoffen, die Umweltkosten fallen jedoch geringer aus. Werden die Gutschriften der Lebenszyklusphase D nicht miteinbezogen, so verursacht der Holzmodulbau mit  $558 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$  rund  $42 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$  weniger Umweltkosten als eine Stahlbetonkonstruktion ( $600 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$ ) der „Montessori Schule“. Werden die Gutschriften berücksichtigt, erhöht sich der Umweltkostenvorteil des Holzmodulbaus auf  $113 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$ .*

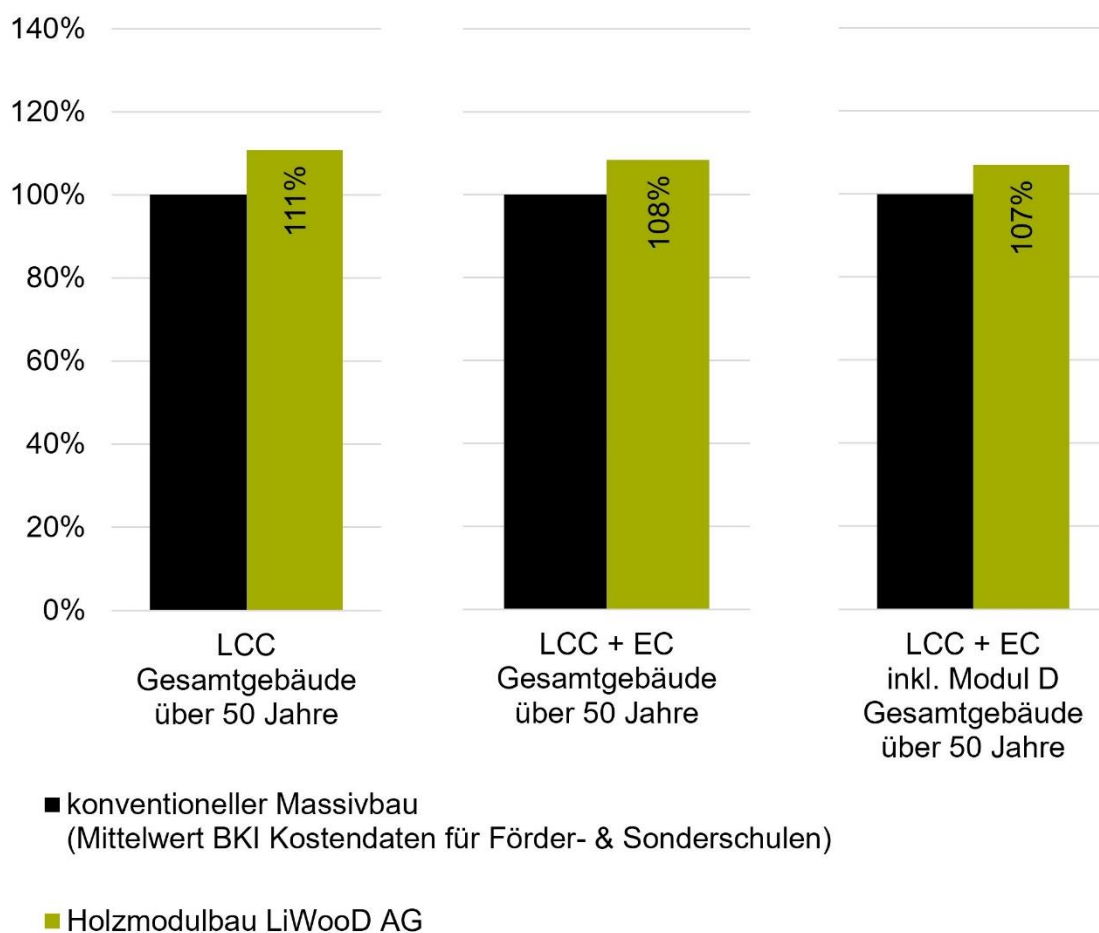


Abbildung 25: Kostenvergleich der Holzmodulbauvariante mit den Lebenszykluskosten (LCC) nach mittleren BKI Kostendaten und Umweltkosten (EC) des Stahlbeton-Zwillings nach eigener Darstellung

Abschließend wird mittels Abbildung 25 die zweite Forschungsfrage (siehe Kapitel 2) beantwortet:

*Durch eine Internalisierung der berechneten maximalen Umweltkosten, bleibt der durchschnittliche Massivbau (mittlere BKI-Kostendaten) über den Lebenszyklus die wirtschaftlichere Variante. Unter Einbezug der Umweltkosten (A1-3, B4, B6, C3-4) verzeichnet die Holzmodulbauvariante 8 % höhere Gesamtkosten als die Konstruktion aus Stahlbeton. Auch unter Berücksichtigung der Gutschriften der Phase D in der Umweltkostenberechnung, ist der Massivbau 7 % günstiger. Im Vergleich mit der teuren Massivbauvariante (maximale BKI-Kostendaten) führt die Internalisierung der Umweltkosten (A1-3, B4, B6, C3-4) zu einem minimalen Kostenvorteil (0,9 %) des Holzmodulgebäudes über den Lebenszyklus.*

Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse folgt eine Analyse über die erforderliche Höhe der Umweltkostensätze, um durch die Internalisierung ein wirtschaftliches Gleichgewicht zwischen Holzmodulbau und durchschnittlich teurem Massivbau herzustellen. Als Grundlage für diese Berechnungen dienen die maximalen Umweltkostensätze gemäß Schneider-Marin und Lang sowie die Lebenszykluskosten unter Ansatz der Mittelwerte des BKI Kostenplaners. Es werden dabei ausschließlich Anpassungen des Umweltkostenwerts für globales Treibhauspotenzial vorgenommen, da dieser Indikator, wie zuvor erläutert, den Großteil der Umweltkosten (bis zu 95 %) abbildet und aktuell im Mittelpunkt öffentlichen und politischen Interesses steht. Tabelle 12 wertet aus, wie hoch der Kostenvor- bzw. -nachteil des Holzmodulbaus je angepasstem Umweltkostensatz ist.

**Tabelle 12: Entwicklung der Kostenvor-/ -nachteile im Holzmodulbau durch Erhöhung des Umweltkostensatzes für globales Treibhauspotenzial**

Kostenvorteile (+)/ -nachteile (-) der Gesamtkosten (LCC + EC) im Holzmodulbau über die Lebenszyklusphasen [%]

Umweltkostensatz für GWP €/kg CO <sub>2</sub> – Äq.	Erhöhungsfaktor	A1-3, B4, B6, C3-4	A1-3, B4, B6, C3-4, D
0,68 €	0	-8 %	-7 %
2,55 €	3,75	-4 %	0 %
6,90 €	10,15	0 %	+8 %

Es zeigt sich, dass der ursprünglich angewandte Kostensatz für globales Erwärmungspotenzial nicht ausreicht, um den Holzmodulbau durch eine Internalisierung der Umweltkosten wirtschaftlich mit konventionellem Massivbau mittlerer Kosten gleichzustellen. Es wäre eine Erhöhung der GWP-Umweltkosten um den Faktor 10,15 auf  $6,90 \text{ €/kg CO}_2 - \text{Äq.}$ , sprich  $6.900 \text{ €/t CO}_2 - \text{Äq.}$  nötig, um die Gesamtkosten (LCC + EC) der Konstruktionsvarianten über den gesamten Lebenszyklus (A1-3, B4, B6, C3-4) ohne die Gutschriften der Phase D auszugleichen. Werden die Gutschriften aus Phase D eingerechnet, ist eine Erhöhung um den Faktor 3,75 ausreichend, um ein monetäres Wettbewerbsgleichgewicht über den Lebenszyklus zu erzielen. Der EC-Kostensatz für GWP würde  $2,55 \text{ €/kg CO}_2 - \text{Äq.}$ , also  $2.550 \text{ €/t CO}_2 - \text{Äq.}$  betragen.



## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden die Ergebnisse für die beiden in Kapitel 2 gestellten Forschungsfragen zusammengefasst. Darauf folgt die kritische Beleuchtung der Berechnungen sowie ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf in diesem Themenfeld.

### 7.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Den Rahmen der Arbeit bildet die Beantwortung der beiden nachfolgend aufgeführten Forschungsfragen. Die detaillierten Ergebnisse der Analysen sind Kapitel 6 zu entnehmen, während die Antworten an dieser Stelle stickpunktartig dargelegt werden:

- Weist ein Gebäude in Holzmodulbauweise geringere Lebenszyklus- und Umweltkosten auf als ein Gebäude in konventioneller Massivbauweise aus mineralischen Baustoffen?*
  - Das analysierte Projekt „Montessori Schule“ weist in Holzmodulbauweise 22 bzw. 11 % höhere Lebenszykluskosten (Herstellung + Nutzung) auf als die Massivbauvariante (bei Anwendung der minimalen bzw. mittleren BKI-Kostensätze). Lediglich die Lebenszykluskosten eines Massivbaus mit hohen Herstellungskosten (maximale Kostensätze nach BKI) entsprechen in etwa den Lebenszykluskosten des Holzmodulgebäudes „Montessori Schule“.
  - Ein Gebäude in Holzmodulbauweise weist geringere Umweltkosten auf als ein Gebäude in konventioneller Massivbauweise aus mineralischen Baustoffen. Werden die Gutschriften der Lebenszyklusphase D nicht einbezogen, so verursacht der Holzmodulbau ( $EC_{\text{Holzmodul}} = 558 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$ ) über 50 Jahre rund  $42 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$  weniger Umweltkosten als ein identisches Gebäude aus Stahlbeton ( $EC_{\text{Stahlbeton}} = 600 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$ ). Wird Phase D berücksichtigt, erhöht sich der Umweltkostenvorteil des Holzmodulbaus auf  $113 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$  ( $EC_{\text{Holzmodul,D}} = 364 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$ ;  $EC_{\text{Stahlbeton,D}} = 477 \text{ €/m}^2_{\text{BGF}}$ ).
  - Bei theoretischer Internalisierung der berechneten Umweltkosten steigen die Herstellungskosten im Massivbau um ~19 % und die Lebenszykluskosten um

~16 %. In der Holzmodulbauweise steigen sowohl die Herstellungs- als auch die Lebenszykluskosten um etwa 13 % an.

## 2. Generieren aktuelle Umweltkostensätze durch die Internalisierung einen wirtschaftlichen Vorteil für die Holzmodulbauweise?

- Durch eine Internalisierung der berechneten maximalen Umweltkosten, bleibt der durchschnittlich teure Massivbau (mittlere BKI-Kostendaten) sowohl in den Erstinvestitionskosten als auch über den Lebenszyklus die wirtschaftlichere Variante.
- Im Vergleich zur teuren Massivbauvariante (maximale BKI-Kostendaten) führt die Internalisierung der Umweltkosten (A1-3, B4, B6, C3-4) zu einem minimalen Kostenvorteil (0,9 %) des Holzmodulgebäudes über den Lebenszyklus.
- Es wäre eine Erhöhung der Umweltkosten für den Indikator „Globales Treibhauspotenzial“ um den Faktor 10,15 auf  $6,90 \text{ €/kg CO}_2 - \text{Äq.}$  nötig, um die Gesamtkosten (LCC + EC) der Konstruktionsvarianten „durchschnittlich teurer Massivbau“ und „Holzmodulbau“ über den gesamten Lebenszyklus (A1-3, B4, B6, C3-4) gleichzustellen. Werden die Gutschriften der Lebenszyklusphase D eingerechnet, ist eine Erhöhung um Faktor 3,75 ausreichend. Der Umweltkostensatz müsste demnach  $2,55 \text{ €/kg CO}_2 - \text{Äq.}$  betragen.

## 7.2. Diskussion

Der Ansatz der in dieser Arbeit angewandten Umweltkostenrechnung ist grundsätzlich an der Orientierung am Prinzip der schwachen Nachhaltigkeit zu kritisieren. Die Berechnung der Umweltkosten eines Gebäudes soll der einfachen und verständlichen Kommunikation von Umweltaspekten sowie bei einer Internalisierung der Steigerung der Wettbewerbschancen umweltfreundlicher Maßnahmen dienen. Dabei darf nicht fälschlicherweise der Eindruck entstehen, dass Umweltschäden durch die Bezahlung einer zusätzlichen Gebühr aufgewogen werden können. Sowohl Ökobilanzen als auch Umweltkostensätze umfassen nur einen Teil der tatsächlichen Umweltwirkungen und nicht alle Umweltschäden können monetarisiert werden. Gerade die Schadenskostensätze für Treibhausgasemissionen weisen eine erhebliche Bandbreite auf und weichen in ihrer

Höhe je nach einbezogener Schadenswirkung stark ab. (Bünger & Matthey, 2020; Schneider-Marin & Lang, 2020)

Die im Rahmen dieser Masterthesis durchgeführten Analysen weisen verschiedene Schwächen bzw. Verbesserungspotenziale auf. Auf diese wird an der jeweiligen Stelle hingewiesen und sie werden nach dem Grundsatz der Transparenz dokumentiert. Die Schwächen umfassen im Wesentlichen Unsicherheiten, Vereinfachungen oder in Kauf genommene Abweichungen in den Kostendaten des BKI, den Ökobilanzdatensätzen bzw. den Plandaten zum Analyseobjekt „Montessori Schule“. Um die Lebenszykluskosten (LCC) und Umweltwirkungen der Konstruktionsvarianten optimal vergleichen zu können, wäre eine detaillierte Planung eines identischen Gebäudes aus Stahlbeton notwendig. Auf diese Weise könnten auch die Unterschiede der technischen Anlagen belastbar gegenübergestellt werden. Im Rahmen der zur Verfügung stehenden Daten wurden bestmögliche Annahmen für eine Vergleichsgrundlage getroffen und transparent dokumentiert.

Durch die Wahl der Lebenszykluskostenanalyse im engeren Sinne für diese Arbeit wurden keine Gewinne des Projekts „Montessori Schule“ kalkuliert. Dadurch gehen wesentliche Vorteile des Holzmodulbaus nicht in die Betrachtungen mit ein. Darunter fällt die sehr kurze Bauzeit und dadurch frühzeitige Vermietbarkeit des Gebäudes. Zur Berücksichtigung dieses Vorteils bedürfte es einer Lebenszykluskostenanalyse im weiteren Sinne. In den Umfang einer solchen Analyse könnte auch eine potenzielle Wertsteigerung des Massivholzgebäudes einfließen, welche die Nachfrage nach nachhaltigen Bauwerken widerspiegelt.

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit konnten bestätigen, dass Umweltkosten (EC) im Gebäudebereich von hoher Relevanz sind und die Lebenszykluskosten im Zuge einer Internalisierung um 13 bis 16 % erhöhen können.

Die einschlägige Studie von Schneider-Marin und Lang berechnet, dass die EC 26 bis 37 % der Herstellungskosten bzw. 16 bis 20 % der gesamten LCC entsprechen. Dabei ist zu beachten, dass im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit weder die LCC noch die EC der Lebenszyklusphase B6, sprich des Endenergiebedarfs über den Betrieb, berücksichtigt werden. Mit der vorliegenden Studie identisch sind die verwendeten Umweltkostensätze, da im Rahmen dieser Masterthesis auf die Untersuchungen von Schneider-Marin und Lang zurückgegriffen wird. (Schneider-Marin & Lang, 2020, S. 1649)

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung analysiert in einem Bericht aus 2010 sechs verschiedene Bürogebäude und eruiert, dass eine Internalisierung von Umweltkosten durchschnittlich 34,5 % höhere Herstellungskosten zur Folge hätte. (BMVBS, 2010, S. 83)

In den aufgeführten Studien zu Umweltkosten im Hochbau werden Bürogebäude analysiert, welche sich in Energiestandard, Versorgungssystemen und Nutzung deutlich vom vorliegenden Analyseobjekt „Montessori Schule“ unterscheiden. Es lässt sich daher vermuten, dass die Herstellungskosten und damit die LCC der Montessori Schule je m<sup>2</sup>BGF höher ausfallen als die der o.g. Bürogebäude. Dadurch verringert sich das Verhältnis der berechneten EC zu den LCC in der vorliegenden Arbeit, sodass der Einfluss bzw. Anteil internalisierter EC für die „Montessori Schule“ geringer ausfällt als in vergleichbaren Studien. Die Internalisierung von Umweltkosten kann bei Projekten mit sehr hohen Herstellungs- bzw. Lebenszykluskosten je m<sup>2</sup>BGF nur dann die Wirtschaftlichkeit der Holzmodulbauweise steigern, wenn entweder der Lebenszykluskostenvorteil der Massivbauweise gering ist, der Umweltkostenvorteil des Holzmodulbaus sehr hoch ist oder sehr hohe Umweltkostensätze für GWP verwendet werden.

Dass die Internalisierung der Umweltkosten in dieser Studie keinen Wirtschaftlichkeitsvorteil für die Holzmodulbauweise erzielen kann, lässt sich somit anhand folgender Aspekte begründen:

1. Die Herstellungskosten der „Montessori Schule“ je m<sup>2</sup>BGF sind relativ hoch, sodass der Einfluss der Umweltkosten auf die Gesamtwirtschaftlichkeit geringer ausfällt.
2. Der Lebenszykluskostenvorteil des Massivbaus liegt unter den Annahmen der vorliegenden Studie bei 11 % (bei Anwendung der mittleren BKI-Kostensätze) und ist in Verbindung mit den unter 1. genannten hohen Herstellungskosten ebenfalls beträchtlich.
3. Die im Rahmen der Arbeit einbezogenen Lebenszyklusphasen (A1-3, B4, B6, C3-4) und Umweltindikatoren (GWP, ODP, POCP, AP, EP) bilden lediglich einen geringen Umweltkostenvorteil für die Holzmodulbauweise ab.

Punkt 3 wiederum begründet sich darin, dass die Brand- und Schallschutzanforderungen der „Montessori Schule“ im Holzbau umfassende Maßnahmen, wie mehrfache Brandschutzkapselung oder mehrschalige Decken- und Wandkonstruktionen

mit Mineralwolle-Dämmung erfordern. Darüber hinaus bedingt die modulare Bauweise im Gegensatz zu konventionellem Bau, wie in den Grundlagen erläutert, doppelte Decken bzw. Böden. Auch die Anwendung massiven Brettspertholzes verursacht einen höheren Bedarf an Bauholz als Holztafelbauweise. Das Prinzip der Suffizienz kann einen entscheidenden Vorteil in den Umweltwirkungen bzw. -kosten beisteuern, denn Schneider-Marin und Lang untersuchen die Umweltwirkungen der Holztafelbauweise gegenüber Stahlbeton und kommen zu dem Schluss, dass die Verwendung nachwachsender Rohstoffe mit guter CO<sub>2</sub>-Bilanz die Umweltkosten eines Projekts deutlich senken kann (Schneider-Marin & Lang, 2020, S. 1649–1651). Wenngleich die LiWood AG auch aktiv auf die Reduktion des Beplankungsverchnittes achtet, liegt der Vorteil der Konstruktion in der langfristigen Einspeicherung von CO<sub>2</sub> durch die Verwendung massiven Brettspertholzes. Diese ökologische Stärke der Bauweise kann im Rahmen der angewandten Methodik zur Berechnung der Umweltkosten über die Mid-Point-Indikatoren der ÖKOBAUDAT nicht erfasst werden.

### 7.3. Ausblick

In Bezug auf den modularen Holzbau und dessen Umweltkosten haben sich im Rahmen der Bearbeitung verschiedene weitere Fragen aufgetan, welche sich als Gegenstand von zukünftigen wissenschaftlichen Betrachtungen anbieten:

- Welche Umwelt(kosten)vorteile birgt der Holzmodulbau durch die langfristige Einlagerung von CO<sub>2</sub> in der Baukonstruktion und mit welchen Umweltkostensätzen kann dies abgebildet werden?
- Welche Umwelt(kosten)vorteile birgt der Holzmodulbau durch die geringere Belästigung der Anwohner im Sinne kürzerer Bauzeiten und geringerer Lärmbelästigung?
- Welche Umweltkosten entstehen durch den Flächenverbrauch im Zuge der Herstellung von Holzprodukten? Sind die Kostensätze, welche in der Methodenkonvention 3.1 des Umweltbundesamtes für Holzbaustoffe ausgewiesen werden, als realistisch anzusehen (Bünger & Matthey, 2020, S. 45–48)?

- Welchen Einfluss haben die Bauprozesse im Holzmodulbau auf dessen Umweltwirkungen und -kosten im Gegensatz zu konventionellen Bauweisen ohne Vorfertigung?
- Können Höhe und Anzahl an Nachträgen durch die detaillierte, vor Baubeginn abgeschlossene Planung im Holzmodulbau reduziert werden?
- Führt die hohe Ausführungsqualität im Holzmodulbau (witterungsgeschützte Fließbandmontage mit detaillierter Planung & dadurch weniger „Improvisation“ in situ) zu weniger Mängeln und Gewährleistungsfällen? Wie schlägt sich dies als monetärer Vorteil über den Lebenszyklus nieder?

Über diese konkreten Fragen hinaus, besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich Umweltkosten im Baubereich. Das BMVBS weist in der Studie „Externe Kosten im Hochbau“ aus dem Jahr 2010 ebenfalls konkret auf diesen hin (BMVBS, 2010, S. 12). Für die Anwendung der Umweltkostenrechnung auf Gebäudeebene bestehen bisher keine allgemein anerkannten und leicht verständlichen Anwendungsgrundlagen sowie genormten Umweltkostensätze. Die Entwicklung eines Standards sowie einer Software mit Anbindung an Ökobilanzdatenbanken könnte die Etablierung in der Baupraxis vorantreiben.

Die in dieser Arbeit zur Berechnung von Umweltkosten berücksichtigten Mid-Point-Indikatoren (GWP, ODP, POCP, AP, EP) führen unter Berücksichtigung der Lebenszyklusphasen Herstellung (A1-3), Nutzung (B4, B6) und Entsorgung (C3, C4) im Holzmodulbau zu lediglich 7 % niedrigeren Umweltkosten als im Stahlbetonbau. Es empfiehlt sich daher weitere Indikatoren wie den Flächenverbrauch und Rohstoffabbau in der Herstellung, langfristige CO<sub>2</sub>-Einlagerung oder Ökosystemleistungen nachhaltig bewirtschafteter Wälder zu untersuchen und zu monetarisieren. Wird die angewandte Methodik zur Berechnung der Umweltkosten genutzt und der Einbezug weiterer Indikatoren ausgeschlossen, so empfiehlt es sich aus umweltpolitischer Sicht, den Fokus auf eine möglichst lange Nutzungszeit zu setzen und eine erneuerbare Energieversorgung sicherzustellen. Im Holzmodulbau könnten geschickte Grundrissgestaltung sowie ein reversibles Modulsystem zur Nutzungsflexibilität beitragen. Auch im LiWood-System ist der modulare Rückbau mit anschließender Neukonstruktion möglich. Für die Stadt München schlug LiWood 2016 den Bau reversibler Flüchtlingswohnheime vor, die am Ende dieser Nutzungsform als sozialer Wohnungsbau rekonstruiert werden können und damit den Bedürfnissen der Nutzer angepasst werden. Das Projekt wurde aus Kostengründen

in regulärem Holzmodulbau beauftragt. Folglich zeichnet sich auch im Themenbereich der Umnutzungsfähigkeit und des reversiblen Holzmodulbaus zukünftiger Forschungsbedarf ab. Für die stoffliche Wiederverwendung von Holzbaustoffen bestehen in der ÖKOBAUDAT derzeit keine Ökobilanzdatensätze, da die Verfeuerung (~80 %) und die stoffliche Verwertung im Sinne eines Downcyclings (~20 %) aktuell die einzig realistischen Entsorgungsszenarien für Altholz darstellen (Rüter & Diederichs, 2012, S. 53, 64). Zur bilanziellen Abbildung des Wiederverwendungsansatzes im Modulbau ist zukünftig auch die Entwicklung angepasster Ökobilanzdaten notwendig.

## 8. Literaturverzeichnis

- Ankrah, N. A., Manu, E. & Booth, C. (2015). *Beyond sustainable buildings: eco-efficiency to eco-effectiveness through cradle-to-cradle design*. 7th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings. <http://irep.ntu.ac.uk/id/eprint/26299/>
- Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen (Hrsg.). (2014). *Bauforschungsbericht: Bd. 66. Optimierter Wohnungsbau: Untersuchung und Umsetzungsbetrachtung zum bautechnisch und kostenoptimierten Mietwohnungsbau in Deutschland*. Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen.
- Bergner, H., Berner, K., Bertig, R., Bracher, A. & Bruckner, H. (2016). *Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen* (A. Albert, K.-J. Schneider & A. Goris, Hg.) (22. Auflage). Bundesanzeiger Verlag.
- Bertschmann, D., Bieler, C. & Sutter, D. (2020). *Hilfestellung für die Monetarisierung von Umweltwirkungen politischer Massnahmen*. Zürich. <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=47543>
- BKI Kostenplaner [Computer software]. (2021). Baukosteninformationszentrum [BKI]. <https://bki.de/kostenplaner/bki-kostenplaner-2021-statistik.html>
- Borchardt, M. & Ortiz, A. (2021). *Rückblick Zwischenbilanz „Serielles und modulares Bauen“*. <https://www.zukunftbau.de/neue-meldung/rueckblick-zwischenbilanz-serielles-und-modulares-bauen>
- Brakus, A. (2015). *Hemmnisse beim Planen und Bauen von mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise* [Masterarbeit]. Technische Universität München, München. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1310351/1310351.pdf>
- Braune, A., Lemaitre, C., Oehler, S., Samsoe, Mikala, Holme, Gemmingen, U. von & Jansen, F. (2018). *Kein "Ja, aber" mehr: Nachhaltig ist das neue Normal*. Ein Auszug aus 11 Jahren DGNB Erfahrung. <https://www.dgnb.de/de/verein/publikationen/index.php#iframe-10>
- Braune, A., Lemaitre, C., Jansen, F. & Gemmingen, U. von. (2020). *Klimapositiv: jetzt! Wie jedes Gebäude einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann*. <https://www.dgnb.de/de/verein/publikationen/index.php>
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung; Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. (2018). *Wege zum Effizienzhaus Plus: Grundlagen und Beispiele für energieerzeugende Gebäude* (6. aktualisierte Auflage, Stand: November 2018). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmi/verschiedene-themen/2018/effizienzhaus-plus.html>
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. (2020). *Gemeinsame Geschäftsordnung der Bundesministerien: GGO*. [https://www.bmi.bund.de/Shared-Docs/downloads/DE/veroeffentlichungen/themen/ministerium/ggo.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=9](https://www.bmi.bund.de/Shared-Docs/downloads/DE/veroeffentlichungen/themen/ministerium/ggo.pdf?__blob=publicationFile&v=9)
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat & Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.). (2021). *ÖKOBAUDAT 2021-II*. <https://www.oeko-baudat.de/>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.). (2015). *Bündnis für bezahlbares Wohnen und Bauen: Bericht der Baukostensenkungskommission*. Endbericht. [https://www.die-wohnraumoffensive.de/fileadmin/user\\_upload/pdf/buendnis-bezahlbares-wohnen-baukostensenkungskommission.pdf](https://www.die-wohnraumoffensive.de/fileadmin/user_upload/pdf/buendnis-bezahlbares-wohnen-baukostensenkungskommission.pdf)



- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.). (2017a). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Steckbriefe BNB-UN - Neubau V2017: Unterrichtsgebäude - Ökologische Qualität*. Bilanzierungsregeln zu Erstellung von Ökobilanzen. <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/unterrichtsgebaeude/>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.). (2017b). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB): Steckbriefe BNB-UN - Neubau V2017. Unterrichtsgebäude - Ökonomische Qualität*. <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/unterrichtsgebaeude/>
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. (2010). *Externe Kosten im Hochbau. BMVBS-Online: Bd. 2010, 17*. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvbs/bmvbs-online/2010/ON172010.html;jsessionid=525F4982D4318CF7452954D46785EE34.live11292>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.). (2019). *Energieeffizienzstrategie 2050*. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=10)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.). (2020). *Wie funktioniert eigentlich der Europäische Emissionshandel?* <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/08/Meldung/direkt-erklaert.html>
- Bünger, B. & Matthey, A. (2018). *Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten: Methodische Grundlagen*. Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-30-zur-ermittlung-von-0>
- Bünger, B. & Matthey, A. (2020). *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten: Kostensätze*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-umweltkosten>
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E. & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3(4), 269–276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- Corestate Capital Group (Hrsg.). (2021). *ECHO München: Montessori-Schule in Holzmodulbauweise*. <https://echo.corestate-capital.com/#holzmodule>
- Deutsche Emissionshandelsstelle (Hrsg.). (2005-2021). *Auktionierung: Deutsche Versteigerungen von Emissionsberechtigungen*. Jahres- bzw. Quartalsberichte 2010 - 2021. [https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/EU-Emissionshandel-verstehen/Versteigerung/Berichte/berichte-node.html;jsessionid=7BC8338C3D586952466FBC0483516721.1\\_cid292](https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/EU-Emissionshandel-verstehen/Versteigerung/Berichte/berichte-node.html;jsessionid=7BC8338C3D586952466FBC0483516721.1_cid292)
- Deutsche Emissionshandelsstelle (Hrsg.). (2018). *Auktionierung: Deutsche Versteigerungen von Emissionsberechtigungen*. Jahresbericht 2018. [https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/versteigerung/2018/2018\\_Jahresbericht.pdf;jsessionid=39DD5B0921C551C7E4FB2A2486C6E315.1\\_cid292?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/versteigerung/2018/2018_Jahresbericht.pdf;jsessionid=39DD5B0921C551C7E4FB2A2486C6E315.1_cid292?__blob=publicationFile&v=4)
- Deutsche Emissionshandelsstelle (Hrsg.). (2021). *Auktionierung: Deutsche Versteigerungen von Emissionsberechtigungen*. Zweites Quartal 2021. [https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/versteigerung/2021/2021\\_Bericht\\_Q2.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/versteigerung/2021/2021_Bericht_Q2.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen 2013-06-26). <https://www.gesetze-im-internet.de/gwb/>
- Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (2020). <http://www.gesetze-im-internet.de/behg/index.html#BJNR272800019BJNE001201125>

- Deutsches Bundeskabinett. (2020). *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III 2020 - 2023: Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen* (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Hg.).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN). *DIN EN 15978:2012-10: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2021). *Monetäre Bewertung von Umweltauswirkungen und damit verbundenen Umweltaspekten* (DIN EN ISO 14008:2021-03). <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14008/327572642>
- DGNB GmbH (Hrsg.). (2018). *Kriterienkatalog Gebäude Neubau*. [https://www.dgnb.de/de/verein/publikationen/bestellung/downloads/DGNB\\_Kriterienkatalog\\_Nebau\\_EV\\_2018.pdf](https://www.dgnb.de/de/verein/publikationen/bestellung/downloads/DGNB_Kriterienkatalog_Nebau_EV_2018.pdf)
- Ecoplan. (2012). *Energiestrategie 2050 - volkswirtschaftliche Auswirkungen: Analyse mit einem berechenbaren Gleichgewichtsmodell für die Schweiz*. Bern.
- Eichhorn, C. von (6. September 2021). Klimawandel könnte bis zu sechsmal teurer werden. *Süddeutsche Zeitung*. <https://www.sueddeutsche.de/wissen/hochwasserkatastrophe-schaeden-kosten-klimawandel-co2-preis-hurrikan-1.5402770>
- EnergieSchweiz. (2017). *Graue Energie von Neubauten: Ratgeber für Baufachleute*. <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8719>
- Enseling, A., Vaché, M. & Hinz, E. (2015). *Weiterentwicklung der Lebenszykluskosten-Methodik*. [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2014/Lebenszykluskosten/Endbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2014/Lebenszykluskosten/Endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- Europäischer Rechnungshof. (2020). *Das Emissionshandelssystem der EU: Kostenlose Zuteilung von Zertifikaten sollte gezielter erfolgen*. Sonderbericht. <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/emissions-trading-system-18-2020/de/>
- European Commission (Hrsg.). (2021). *Strukturelle Reform des EU-Emissionshandelssystems*. [https://ec.europa.eu/clima/policies/reform\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/reform_de)
- European Environment Agency. (2016). *Circular economy in Europe: Developing the knowledge base*. EEA report: No. 2/2016. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/51444>
- Forum-Holzbau (Hrsg.) (2017). *Individuelles Bauen mit industrieller Fertigung: Hausbau 4.0*. [https://www.forum-holzbau.com/pdf/25\\_IHF2017\\_Wildemann.pdf](https://www.forum-holzbau.com/pdf/25_IHF2017_Wildemann.pdf)
- Geier, S. (2018). *Analysemodell für das vorgefertigte Bauen mit Holz: Lösungsansatz zur Einschätzung und zum Umgang mit Komplexität*. *Argumentarium – Entwicklung – Anwendung* [Dissertation]. Technische Universität München, München. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1415118/1415118.pdf>
- Gellrich, A. (2021). *Umweltbewusstsein in Deutschland 2020*. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/factsheet\\_zentrale\\_ergebnisse\\_umweltbewusstsein\\_2020\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/factsheet_zentrale_ergebnisse_umweltbewusstsein_2020_0.pdf)
- Gerbert, P., Herhold, P., Burchard, J., Schönberger, S., Rechenmacher, F., Kirchner, A., Kemmler, A. & Wunsch, M. (2018). *Klimapfade für Deutschland*. <https://web-assets.bcg.com/e3/06/1c25c60944a09983526ff173c969/klimapfade-fuer-deutschland.pdf>
- Grimm, R. (2019). *Was versteht man unter Modulbauweise?* [https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/forschung\\_technik\\_trends/was-versteht-man-unter-modulbauweise/](https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/forschung_technik_trends/was-versteht-man-unter-modulbauweise/)
- Hafner, A., Rüter, S [S.], Ebert, S., Schäfer, S., König, H., Cristofaro, L., Diederichs, S [S.], Kleinhenz, M. & Krechel, M. (2017). *Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden: Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung*

- empirischer Substitutionsfaktoren.* (THG-Holzbau). Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau- und Reaktorsicherheit (BMUB). <https://mediatum.ub.tum.de/1522711>
- Hillemacher, M. (22. November 2018). Darum scheitert der serielle Wohnungsbau. *Immobilien Zeitung*, 2018(IZ 47). <https://www.iz.de/maerkte/news/-darum-scheitert-der-serielle-wohnungsbau-148977?crefresh=1>
- Höglmeier, K. (2015). *Holznutzung in Kaskaden: Ansätze zur Potentialanalyse und zur ökobilanziellen Bewertung* [Dissertation, Technische Universität München, München]. RIS. <https://mediatum.ub.tum.de/1246245>
- Holzbau Deutschland. (2021). *Lagebericht 2021: Zimmerer/ Holzbau*. [https://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/eingebundene\\_Downloads/Lagebericht\\_2021\\_mit\\_Statistiken.pdf](https://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user_upload/eingebundene_Downloads/Lagebericht_2021_mit_Statistiken.pdf)
- Horváth & Partners. (2017). *Umfrage zu alternativen Bauweisen zum Massivbau im Bildungsbau 2017*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1008612/umfrage/umfrage-zu-alternativen-bauweisen-neben-dem-massivbau/>
- IFB Hamburg. (2021, 11. Januar). *Energetische Modernisierung und Holzbau für Nichtwohngebäude: Förderrichtlinie für die energetische Modernisierung der Gebäudehülle, die Energieberatung und die Verwendung von Holz beim Neubau von Nichtwohngebäuden* [Press release]. <https://www.ifbhh.de/api/services/document/505>
- International Energy Agency. (2017). *World Energy Outlook 2017*. International Energy Agency. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/4a50d774-5e8c-457e-bcc9-513357f9b2fb/World\\_Energy\\_Outlook\\_2017.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/4a50d774-5e8c-457e-bcc9-513357f9b2fb/World_Energy_Outlook_2017.pdf)
- ISO (07.2017). *Buildings and constructed assets - Service life planning: Part 5: Lifecycle costing* (ISO 15686-5:2017). <https://www.beuth.de/de/norm/iso-15686-5/278003880>
- ISO (2021). *Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken - Rahmenbedingungen für Methoden zur Bewertung der umweltbezogenen, sozialen und ökonomischen Qualität von Bauwerken als Grundlagen für die Nachhaltigkeitsbewertung: Teil 1: Gebäude* (ISO/DIS 21931-1:2021(E)).
- Jösch, G. (2019). Bauen mit vorgefertigten Raumsystemen. In *Modulbau: Planen und Bauen mit Raummodulen und vorgefertigten Elementen : Erfahrungen aus der Praxis für die Praxis* (1. Aufl., S. 8–19). Detail corporate.
- Kaufmann, H., Krötsch, S. & Winter, S. (2017). *Atlas: Mehrgeschossiger Holzbau* (erste Auflage). Detail Business Information GmbH.
- Kikstra, J. S., Waidelich, P., Rising, J., Yumashev, D., Hope, C. & Brierley, C. M. (2021). The social cost of carbon dioxide under climate-economy feedbacks and temperature variability. *Environmental Research Letters*, 16(9), 94037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1d0b>
- Knaack, U., Chung-Klatte, S. & Hasselbach, R. (2012). *Systembau: Prinzipien der Konstruktion. Prinzipien der Konstruktion*. Birkhäuser.
- LiWood AG (Hrsg.). (2019). *Imagebroschüre LiWood*. [https://www.liwood.com/wp-content/uploads/2019/02/Liwood\\_Image\\_Broschuere\\_web.pdf](https://www.liwood.com/wp-content/uploads/2019/02/Liwood_Image_Broschuere_web.pdf)
- Maibach, M., Sieber, N., Bertenrath, R., Ewingmann, D., Koch, L., Thöne, M. & Bickel, P. (2007). *Praktische Anwendung der Methodenkonvention: Möglichkeiten der Berücksichtigung externer Umweltkosten bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen von öffentlichen Investitionen*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/praktische-anwendung-methodenkonvention>
- Markus Schaupp, Prof. Dr. Michael Eßig & Christian von Deimling. (2017). *Anwendung von Werkzeugen der innovativen öffentlichen Beschaffung in der Praxis: Eine Analyse der TED-Datenbank*. Universität der Bundeswehr München, München.

- [https://www.koinno-bmwi.de/fileadmin/user\\_upload/publikationen/Analyse\\_Ted-Datenbank\\_Anwendung\\_von\\_Werkzeugen.pdf](https://www.koinno-bmwi.de/fileadmin/user_upload/publikationen/Analyse_Ted-Datenbank_Anwendung_von_Werkzeugen.pdf)
- Martin, A. R., Doraisami, M. & Thomas, S. C. (2018). Global patterns in wood carbon concentration across the world's trees and forests. *Nature Geoscience*, 11(12), 915–920. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0246-x>
- Merk, M. (2020). Die Muster HolzBauRichtlinie: Erweiterte Regelungen für das Bauen mit Holz bis zur Hochhausgrenze. *Bautechnik*, 97(8), 583–588. <https://doi.org/10.1002/bate.202000069>
- Mestek, P., Werther, N. & Winter, S. (2016). *Bauen mit Brettsper Holz: Tragende Massivholzelemente für Wand, Decke und Dach*. Planen und Bauen mit Brettsper Holz. [https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/2\\_Holzbau\\_Handbuch/R04\\_T06\\_F01\\_Bauen\\_mit\\_Brettsper Holz.pdf](https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/2_Holzbau_Handbuch/R04_T06_F01_Bauen_mit_Brettsper Holz.pdf)
- Oberpiller, Q., Peter, M., Füssler, J., Zimmer, A., Aboumehboub, T., Schleyen, J., Gidden, M., Schaeffer, M., Scheussner, C.-F. & Schwarze, R. (2021). *Climate cost modelling: Analysis of damage and mitigation frameworks and guidance for political use*. Dessau-Roßlau. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc\\_68-2021\\_climate\\_cost\\_modelling.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_68-2021_climate_cost_modelling.pdf)
- OECD.Stat. (2021, 1. September). *Purchasing Power Parities for GDP and related indicators*. <https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=PPPGDP>
- Opitsch, W. (2018). *Nachhaltige Stadtentwicklung: Strategien der Stadt München*. 24. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen. [https://www.forum-holzbau.com/pdf/70\\_IHF2018\\_Opitsch.pdf](https://www.forum-holzbau.com/pdf/70_IHF2018_Opitsch.pdf)
- Pizzol, M., Laurent, A., Sala, S., Weidema, B., Verones, F. & Koffler, C. (2017). Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(6), 853–866. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1199-1>
- Pomponi, F. & Moncaster, A. (2018). Scrutinising embodied carbon in buildings: The next performance gap made manifest. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2431–2442. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.049>
- Porsch, L., Sutter, D., Maibach, M., Preiss, P. & Müller, W. (2015). *Leitfaden zur Nutzen-Kosten-Abschätzung umweltrelevanter Effekte in der Gesetzesfolgenabschätzung*. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_01\\_2015\\_leitfaden\\_nutzen\\_kosten.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_01_2015_leitfaden_nutzen_kosten.pdf)
- Rathmann, J., Dubrow, C. & Eberhardt, A. (2019). *Naturkapital Bayern: Machbarkeitsstudie zur ökonomischen Bewertung von Naturkapital und Ökosystemleistungen in Bayern: Ein landnutzungsbasierter Bewertungsansatz am Beispiel des bayerischen Vertragsnaturschutzprogramms* [Schlussbericht]. Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg. <https://www.lfu.bayern.de/natur/oekosystemleistungen/machbarkeitsstudie/index.htm>
- RM Handelsmedien GmbH & Co. KG (Hrsg.). (2019). *Seriell, modular, leicht - Zukunft Bau?* <https://www.baufachmedien.de/marktforschungsstudie-serielles-bauen.html#e-book-pdf>
- Runst, P. & Thonipara, A. (2019). Why the Scope of the Carbon Tax Matters – Evidence from the Swedish Residential Sector. *SSRN Electronic Journal*. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3452019>
- Rüter, S [Sebastian] & Diederichs, S [Stefan]. (2012). *Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz*. [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn050490.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn050490.pdf)
- Salthammer, T. & Marutzky, R. (2013). *Bauen und Leben mit Holz*. [https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/3\\_Spezial/Spezial\\_Bauen\\_und\\_Leben\\_mit\\_Holz\\_2013.pdf](https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/3_Spezial/Spezial_Bauen_und_Leben_mit_Holz_2013.pdf)

- Schneider-Marin, P. & Lang, W. (2020). Environmental costs of buildings: monetary valuation of ecological indicators for the building industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(9), 1637–1659.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-020-01784-y>
- Stadt Freiburg. (2020, 1. Januar). *Richtlinie zum Förderprogramm Holzbau der Stadt Freiburg* [Press release]. Freiburg im Breisgau. [https://www.freiburg.de/pb/site/Freiburg/get/params\\_E243851456/1486317/Richtlinie\\_zum\\_Foerderprogramm\\_Holzbau\\_der\\_Stadt\\_Freiburg\\_i.\\_Br.pdf](https://www.freiburg.de/pb/site/Freiburg/get/params_E243851456/1486317/Richtlinie_zum_Foerderprogramm_Holzbau_der_Stadt_Freiburg_i._Br.pdf)
- Staib, G., Dörrhöfer, A. & Rosenthal, M. (2008). *Elemente und Systeme: Modulares Bauen - Entwurf, Konstruktion, neue Technologien* (1. Aufl.). Edition Detail. Birkhäuser. <https://doi.org/10.11129/detail.9783034615679>
- Statistisches Bundesamt. (2020). *Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach überwiegend verwendetem Baustoff: Lange Reihen von 2000 bis 2019*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/baufertigstellungen-baustoff-pdf-5311202.html>
- Sustainability Impact Metrics. (2021). *The way eco-costs of emissions are determined*. <https://www.ecocostsvalue.com/eco-costs/eco-costs-emissions/>
- Tekie, H. & Lindblad, M. (2013). *Methodologies for monetary valuation of environmental impacts: State of the Art*. [https://www.lifecyclecenter.se/wp-content/uploads/2013\\_4-State-of-the-art\\_Methodologies-for-monetary-valuation-of-environmental-impacts.pdf](https://www.lifecyclecenter.se/wp-content/uploads/2013_4-State-of-the-art_Methodologies-for-monetary-valuation-of-environmental-impacts.pdf)
- Umweltbundesamt. (2012). *Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten: Ökonomische Bewertung von Umweltschäden*. <https://digital.zlb.de/viewer/api/v1/records/15651472/files/images/4418.pdf/full.pdf>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2021a). *Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2021b). *Nachhaltige Waldwirtschaft*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/nachhaltige-waldwirtschaft#die-vielfaltigen-funktionen-des-waldes>
- Umweltbundesamt. (2021c). *Treibhausgasemissionen in Deutschland 2020 Schätzung*. <https://www.umweltbundesamt.de/galerie/treibhausgasemissionen-in-deutschland-2020>
- United Nations Environment Programme. (2020). *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. [https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR\\_FULL%20REPORT.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf)
- WBAE & WBW. (2016). *Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung: Gutachten*. [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Ministerium/Beiraete/agrarpolitik/Klimaschutzgutachten\\_2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/agrarpolitik/Klimaschutzgutachten_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- Wegener, G., Pähler, A. & Tratzmiller, M. (2010). *Bauen mit Holz = aktiver Klimaschutz: Ein Leitfaden*. Technische Universität München, München. <https://www.cluster-forstholzbayern.de/images/stories/downloads/broschuere/broschuere-bauen-mit-holz-klimaschutz.pdf>
- Weltklimarat. (2021). *Sechster IPCC-Sachstandsbericht (AR6) 2021-2022: Beitrag von Arbeitsgruppe I: Naturwissenschaftliche Grundlagen*. Hauptaussagen. <https://www.de-ipcc.de/270.php>

- Winter, S., Lechner, M. & Köhler, C. (2019). *Bauen mit Weitblick: Systembaukasten für den industrialisierten sozialen Wohnungsbau* [, Technische Universität München, München]. RIS. <https://mediatum.ub.tum.de/1574236>
- The World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future: Brundtland-Bericht*. <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>
- World Economic Forum (2020). *The Global Risks Report 2020: 15th Edition*. [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Global\\_Risk\\_Report\\_2020.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf)

## 9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Globale energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen 2019 nach eigener Darstellung gemäß (United Nations Environment Programme, 2020, S. 4).....	1
Abbildung 2: Entwicklung des gesetzlich geforderten und technisch realisierbaren Heiz-Primärenergiebedarfs nach eigener Darstellung gemäß (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung & Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2018, S. 5).....	2
Abbildung 3: Entwicklung der Treibhausgasemissionen für Konstruktion und Energieverbrauch im Betrieb DGNB-zertifizierter Gebäude nach eigener Darstellung gemäß (Braune et al., 2018, S. 13).....	3
Abbildung 4: Methodisches Vorgehen im Rahmen der Masterthesis nach eigener Darstellung .....	6
Abbildung 5: Systematik, einbezogene Kostengruppen und Datenquellen zur Erstellung der Lebenszyklus- und Umweltkostenanalysen im Rahmen der Masterthesis nach eigener Darstellung .....	7
Abbildung 6: Im Rahmen der LCA und LCC berücksichtigte Lebenszyklusphasen nach eigener Darstellung gemäß DIN EN 15978 (DIN, S. 21) .....	8
Abbildung 7: Methodik zur Umweltkostenberechnung im Gebäudesektor durch die Gewichtung von Mid-Point-Indikatoren einer Ökobilanz nach eigener Darstellung gemäß (Schneider-Marin & Lang, 2020, S. 1639).....	9
Abbildung 8: Dimensionen vorgefertigter Elemente im Bauwesen nach (Kaufmann et al., 2017, S. 143) .....	11
Abbildung 9: Vorgänge der Bauausführung im LiWood-Holzmodulbau nach eigener Darstellung in Anlehnung an (Forum-Holzbau, 2017, S. 4) .....	13
Abbildung 10: CO <sub>2</sub> -Emission bzw. -speicherung in der Herstellungsphase (Cradle-to-Gate) nach eigener Darstellung gemäß (Pomponi & Moncaster, 2018) und (Churkina et al., 2020, Fig. 2).....	17
Abbildung 11: Konzept der Kaskadennutzung von Holzprodukten nach eigener Darstellung gemäß (Höglmeier, 2015, S. 7).....	19
Abbildung 12: Ökosystemleistungen nachhaltig bewirtschafteter Wälder nach eigener Darstellung gemäß (Umweltbundesamt, 2021b) .....	19

Abbildung 13: Baufertigstellungen von Wohngebäuden mit $\geq 3$ Wohneinheiten und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff in Deutschland nach eigener Darstellung gemäß (Statistisches Bundesamt, 2020) .....	23
Abbildung 14: Entwicklung der jährlichen Durchschnittspreise für Emissionszertifikate des EU-ETS nach eigener Darstellung mit Daten gemäß (DEHSt, 2005-2021).....	31
Abbildung 15: Arten von Umweltkostensätzen nach Bezugsebenen (Emission/ Mid-Point-/ End-Point-Indikator) nach eigener Darstellung.....	35
Abbildung 16: Rendering der "Montessori Schule" (Corestate Capital Group, 2021) ..	40
Abbildung 17: 3D-Skizze des Projekts "Montessori Schule" mit angedeutetem Modulraster und Maßen nach eigener Darstellung.....	41
Abbildung 18: Schnitt-Skizzen des Projekts "Montessori Schule" am Treppenhaukern (links) bzw. im Standardquerschnitt (rechts) nach eigener Darstellung .....	41
Abbildung 19: Gegenüberstellung der Lebenszyklus-, Herstellungs- und Nutzungskosten der Konstruktionsvarianten Holzmodulbau und Massivbau nach eigener Darstellung.....	47
Abbildung 20: Umweltkosten über den gesamten Lebenszyklus (A1-3, B4, B6, C3-4) der „Montessori Schule“ nach Mid-Point-Indikatoren sowie Gegenüberstellung der minimalen und maximalen Kostensätze nach eigener Darstellung .....	49
Abbildung 21: Auswertung der Umweltkosten in [€/m <sup>2</sup> BGF] je Lebenszyklusphase nach eigener Darstellung .....	51
Abbildung 22: Umweltkosten in [€/m <sup>2</sup> BGF] der Konstruktionsvarianten ohne EC des Endenergiebedarfs (Phase B6) nach eigener Darstellung.....	53
Abbildung 23: Umweltkosten in [€/m <sup>2</sup> BGF] über die Lebenszyklusphasen A1-3, B4 und C3-4 aufgeschlüsselt nach wesentlichen Baustoffgruppen nach eigener Darstellung	54
Abbildung 24: Umweltkosten in [€/m <sup>2</sup> BGF] über die Lebenszyklusphasen A1-3, B4, C3-4 und D aufgeschlüsselt nach wesentlichen Baustoffgruppen nach eigener Darstellung.....	55
Abbildung 25: Kostenvergleich der Holzmodulbauvariante mit den Lebenszykluskosten (LCC) nach mittleren BKI Kostendaten und Umweltkosten (EC) des Stahlbeton-Zwillings nach eigener Darstellung.....	56



## 10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Vorteile der Holzmodulbauweise aus Brettsperrholz nach eigener Darstellung mit Daten nach (Mestek et al., 2016, S. 5) .....	15
Tabelle 2: Beispielhafte Hemmnisse beim Einsatz mehrgeschossigen Holzbaus gemäß (Hafner et al., 2017, S. 85–107) .....	24
Tabelle 3: Staffelung der CO <sub>2</sub> -Bepreisung für fossile Heiz- und Brennstoffe gemäß (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG, 2020, § 10) .....	31
Tabelle 4: Rahmenbedingungen der Lebenszykluskostenanalyse in dieser Arbeit in Anlehnung an (BMUB, 2017b) .....	37
Tabelle 5: Einbezogene Kostengruppen und Datenquellen für die Lebenszykluskostenanalyse der vorliegenden Arbeit .....	38
Tabelle 6: Rahmenbedingungen der Ökobilanz im Rahmen dieser Arbeit .....	39
Tabelle 7: Eckdaten zum Analyseobjekt "Montessori Schule" .....	42
Tabelle 8: Ergebnisse der Ökobilanz der "Montessori Schule" in der Konstruktionsvariante "Holzmodulbau" .....	43
Tabelle 9: Ergebnisse der Ökobilanz der "Montessori Schule" in der Konstruktionsvariante "Stahlbeton" .....	43
Tabelle 10: Umweltkostensätze zur Monetarisierung der berechneten Umweltwirkungen im Rahmen dieser Arbeit .....	45
Tabelle 11: Umweltkosten in [€/m <sup>2</sup> BGF] je Lebenszyklusphase zu Abbildung 21 .....	52
Tabelle 12: Entwicklung der Kostenvor-/ -nachteile im Holzmodulbau durch Erhöhung des Umweltkostensatzes für globales Treibhauspotenzial .....	57

## Anhang A

Daten zu Abbildung 13 gemäß (Statistisches Bundesamt, 2020):

Jahr	Gebäudeart	Gebäudefer- tigstellungen (insgesamt)	Holz	Stahl	Stahlbeton	Ziegel	Sonstiger Mauerstein <sup>3</sup>	Sonstiger Baustoff
2010	Wohngebäude insgesamt	84.340	14,7%	0,1%	6,4%	34,7%	17,5%	26,7%
	mit 1 Wohnung	70.965	15,9%	0,1%	6,0%	34,2%	17,6%	26,3%
	mit 2 Wohnungen	7.201	14,2%	0,1%	5,5%	38,4%	16,2%	25,7%
	mit 3 Wohnungen oder mehr	6.036	2,1%	0,1%	11,5%	35,8%	18,5%	32,0%
	Wohngebäude Fertigteilbau	11.753	85,9%	0,5%	10,4%	0,3%	0,3%	2,5%
	Nichtwohngebäude insgesamt	26.990	20,2%	20,3%	26,9%	15,9%	6,5%	10,2%
2011	Wohngebäude insgesamt	96.549	15,0%	0%	7,0%	34,1%	32,1%	11,8%
	mit 1 Wohnung	81.101	16,2%	0%	6,3%	33,6%	32,5%	11,4%
	mit 2 Wohnungen	7.957	14,3%	0%	5,9%	38,2%	29,1%	12,5%
	mit 3 Wohnungen oder mehr	7.330	2,1%	0%	15,7%	35,2%	31,0%	16,0%
	Wohngebäude Fertigteilbau	13.224	87,6%	0%	8,7%	0,4%	0,7%	2,4%
	Nichtwohngebäude insgesamt	28.473	18,5%	22,4%	28,2%	15,2%	9,4%	6,3%
2012	Wohngebäude insgesamt	100.816	14,9%	0%	7,3%	32,9%	39,0%	5,9%
	mit 1 Wohnung	84.324	16,4%	0%	6,2%	32,6%	39,2%	5,7%
	mit 2 Wohnungen	7.985	13,2%	0%	6,6%	37,4%	36,3%	6,5%
	mit 3 Wohnungen oder mehr	8.365	1,8%	0%	18,7%	32,4%	40,1%	7,0%
	Wohngebäude Fertigteilbau	14.007	88,6%	0%	7,7%	0,6%	1,1%	2,0%
	Nichtwohngebäude insgesamt	27.642	19,2%	23,9%	28,1%	14,1%	10,5%	4,2%

<sup>3</sup> Kalksandstein/ Porenbeton/ Leichtbeton/ Bims ect.

Jahr	Gebäudeart	Gebäudefer- tigstellungen (Insgesamt)	Holz	Stahl	Stahlbeton	Ziegel	Sonstiger Mauerstein <sup>3</sup>	Sonstiger Baustoff
2013	Wohngebäude insgesamt	103.331	15,8%	0%	7,2%	32,5%	41,0%	3,6%
	mit 1 Wohnung	85.332	17,3%	0%	6,0%	32,1%	41,0%	3,5%
	mit 2 Wohnungen	8.457	14,8%	0%	6,6%	37,3%	37,5%	3,7%
	mit 3 Wohnungen oder mehr	9.392	2,3%	0%	18,8%	31,5%	43,4%	3,9%
	Wohngebäude Fertigteilbau	15.088	89,1%	0%	7,1%	0,6%	1,3%	1,9%
	Nichtwohngebäude insgesamt	27.583	18,1%	24,2%	28,4%	14,3%	11,6%	3,4%
2014	Wohngebäude insgesamt	108.908	15,2%	0%	7,8%	31,9%	42,5%	2,6%
	mit 1 Wohnung	87.868	17,1%	0%	6,4%	31,5%	42,5%	2,6%
	mit 2 Wohnungen	9.489	13,6%	0%	6,3%	37,3%	39,6%	3,2%
	mit 3 Wohnungen oder mehr	11.358	2,1%	0%	19,8%	30,4%	45,1%	2,7%
	Wohngebäude Fertigteilbau	15.523	88,4%	0%	7,9%	0,4%	1,4%	1,9%
	Nichtwohngebäude insgesamt	26.825	18,3%	24,6%	28,4%	13,4%	12,1%	3,2%
2015	Wohngebäude insgesamt	105.568	15,7%	0%	7,6%	31,5%	43,1%	2,1%
	mit 1 Wohnung	84.603	17,7%	0%	6,1%	31,1%	43,0%	2,1%
	mit 2 Wohnungen	9.055	14,0%	0%	6,6%	37,0%	40,1%	2,2%
	mit 3 Wohnungen oder mehr	11.690	2,3%	0%	19,4%	30,0%	46,4%	1,9%
	Wohngebäude Fertigteilbau	15.854	85,9%	0,1%	9,2%	1,1%	1,8%	1,9%
	Nichtwohngebäude insgesamt	25.123	17,8%	25,7%	29,1%	12,9%	11,8%	2,8%
2016	Wohngebäude insgesamt	109.990	16,1%	0%	7,5%	30,4%	43,7%	2,2%
	mit 1 Wohnung	87.743	18,1%	0%	5,9%	30,2%	43,6%	2,2%
	mit 2 Wohnungen	9.279	14,5%	0%	6,1%	35,5%	41,4%	2,4%
	mit 3 Wohnungen oder mehr	12.437	2,7%	0%	19,0%	28,9%	47,6%	1,8%
	Wohngebäude Fertigteilbau	17.338	85,4%	0,3%	10,1%	0,7%	1,7%	1,9%

Jahr	Gebäudeart	Gebäudefer- tigstellungen (Insgesamt)	Holz	Stahl	Stahlbeton	Ziegel	Sonstiger Mauerstein <sup>3</sup>	Sonstiger Baustoff
2016	Nichtwohngebäude insgesamt	24.402	17,3%	25,7%	29,5%	12,5%	12,2%	2,8%
2017	Wohngebäude insgesamt	110.051	16,8%	0%	7,3%	31,2%	42,9%	1,7%
	mit 1 Wohnung	86.440	19,1%	0%	5,6%	30,9%	42,8%	1,7%
	mit 2 Wohnungen	9.754	16,4%	0%	5,7%	37,3%	38,9%	1,8%
	mit 3 Wohnungen oder mehr	13.348	2,7%	0%	18,5%	29,7%	47,6%	1,5%
	Wohngebäude Fertigteilbau	17.936	87,5%	0,1%	7,5%	1,0%	2,5%	1,3%
	Nichtwohngebäude insgesamt	23.956	17,3%	25,5%	30,0%	12,5%	12,2%	2,6%
2018	Wohngebäude insgesamt	107.581	17,6%	0%	7,7%	30,5%	42,7%	1,5%
	mit 1 Wohnung	83.503	20,0%	0%	5,8%	30,3%	42,4%	1,5%
	mit 2 Wohnungen	9.930	18,0%	0%	6,4%	35,4%	38,5%	1,6%
	mit 3 Wohnungen oder mehr	13.814	2,8%	0%	19,3%	28,3%	48,2%	1,3%
	Wohngebäude Fertigteilbau	18.649	86,1%	0,1%	8,2%	1,2%	3,4%	1,1%
	Nichtwohngebäude insgesamt	24.321	20,8%	25,3%	28,0%	11,6%	11,9%	2,4%
2019	Wohngebäude insgesamt	108.071	18,1%	0%	7,8%	30,4%	42,3%	1,4%
	mit 1 Wohnung	83.804	20,6%	0%	5,9%	30,5%	41,6%	1,4%
	mit 2 Wohnungen	9.653	17,8%	0%	6,5%	34,6%	39,4%	1,7%
	mit 3 Wohnungen oder mehr	14.402	3,5%	0%	19,4%	27,3%	48,8%	1,0%
	Wohngebäude Fertigteilbau	19.217	86,5%	0,1%	7,9%	1,3%	3,1%	1,2%
	Nichtwohngebäude insgesamt	23.642	17,8%	26,2%	29,1%	11,8%	12,5%	2,6%

## Anhang B

Die Nachstehende Tabelle umfasst alle erfassten Baustoffe und Bauteile im Rahmen der durchgeführten Ökobilanzen mit Vermerk des verwendeten Datensatzes zur Abschätzung der potenziellen Umweltwirkung. Die grün markierten Positionen finden ausschließlich in der Ökobilanz der Holzmodulkonstruktion Anwendung, während die orange markierten nur der Konstruktionsvariante aus Stahlbeton zuzuordnen sind. Die Positionen in schwarzer Schrift finden sich in beiden Ökobilanzen wieder. Am Ende der Tabelle befindet sich eine Auflistung der Baustoffe, die mangels passender Ökobilanzdaten nicht erfasst werden konnten.

Menge <sup>4</sup>	Einheit	Baustoff/ Bauteil	UUID ÖKOBAU- DAT bzw. Link zur EPD
17400	kg	Mörtelstreifen auf Bodenplatte (h=60 mm, 11,6 m <sup>3</sup> )	9ba8d296-ee24-4d84-bb9f-8cd0db2c846f
238	m <sup>2</sup>	PUR Dämmung über Tiefgarage WLG 024; h=40 mm (Umrechnung auf m <sup>2</sup> mit h=120 mm entspr. Datensatz)	880e05ea-55c6-4346-a3ea-5af0e5f299e2
493	m <sup>2</sup>	PUR Dämmung über Tiefgarage WLG 024; h=40 mm (Umrechnung auf m <sup>2</sup> mit h=120 mm entspr. Datensatz)	880e05ea-55c6-4346-a3ea-5af0e5f299e2
43	m <sup>3</sup>	Brettschichtholz-Sockel Außenwände	c364d223-fd4c-48e7-ba60-9940aa74d098
205	m <sup>3</sup>	Brettsperrholz Außenwände	d8d40f2d-fd1c-4239-ba9f-c1e33fd6f28f
3800	kg	konstruktive Verbindungsmittel der Modulwände/ -decken/ -böden	b9c775be-d100-4d35-bdf3-c5964e655692

<sup>4</sup> entsprechend deklarerter Einheit des jeweiligen Ökobaudat-Datensatzes

7148	m <sup>2</sup>	Beplankung Gipsfaserplatten	6d535792-4351-4d7d-97c6-6d2c3624f3e0
495	m <sup>3</sup>	Ortbetonwände C25/30, 250mm, 2400 kg/m <sup>3</sup>	71667cf3-ede8-42d2-b0ff-6f1071ad3b86
23760	kg	inkl. 2 % Armierung	e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082; EoL: f34a799a-52de-4f69-a623-335f5be207d9
1762	m	Blendrahmen PVC	5e90e94d-6e79-4d9f-854c-fb33f15c033e
1529	m	Flügelrahmen PVC	91ea177a-e65a-4fe2-ac2d-2f378a03e168
467	m <sup>2</sup>	Glas (3-fach Verglasung)	fa9f6670-3170-4597-92ab-a2fdec7f1451
77	m <sup>3</sup>	KVH-Ständer Dämmfassade	d1050c0d-a62f-4347-8ae6-2f31532caeec
326	m <sup>3</sup>	Mineralwolledämmung 180mm, WLG032	f8afef87-5de3-4996-838c-1f2af9ef81df
2035	m <sup>2</sup>	Unterspannbahn Fassade	a92bd5a5-7cef-4050-8659-20a8d5a7a72b
9	m <sup>3</sup>	KVH-Unterkonstruktion der Außenfassade	d1050c0d-a62f-4347-8ae6-2f31532caeec
3	m <sup>3</sup>	Holzfassade	d1050c0d-a62f-4347-8ae6-2f31532caeec
297	m <sup>2</sup>	Faserzementplatten an Treppenhausfassade	e24f9f47-8580-45c2-b16d-45145d65a813
2013	m <sup>2</sup>	Wärmedämmverbundsystem 200 mm Mineralwolle	cc522095-42b9-49ef-ae6e-2d39cd851513 inkl. Anpassung der Dämmstoffdicke gemäß Anhang zu EPD-WDV-20170078-IBG1-D
374	m <sup>2</sup>	textiler Sonnenschutz	5662c927-cd47-46e5-b753-925db31b9870
9919	m <sup>2</sup>	Beplankung Gipsfaserplatten	6d535792-4351-4d7d-97c6-6d2c3624f3e0
2	m <sup>3</sup>	Brettschichtholz-Sockel Innenwände	c364d223-fd4c-48e7-ba60-9940aa74d098
330	m <sup>3</sup>	Brettsperrholz-Wände	d8d40f2d-fd1c-4239-ba9f-c1e33fd6f28f
83	m <sup>3</sup>	Mineralwolle in Trennfugen zwischen Modulwänden	ec17f51c-27ff-4729-977e-cd0e273c2ee3

319	m <sup>3</sup>	Ortbetonwände C25/30, 100mm, 2400 kg/m <sup>3</sup>	71667cf3-ede8-42d2-b0ff-6f1071ad3b86
15312	kg	inkl. 2 % Armierung	e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082; EoL: f34a799a-52de-4f69-a623-335f5be207d9
63	Stk	Innentüren Holzumfassungszarge, Türblatt aus Röhrenspan HPL (144 m <sup>2</sup> )	<a href="https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/12471">https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/12471</a>
70	m <sup>2</sup>	Brandschutztüren T90 (20 Stk.)	34a3f341-4af5-4ad4-9e17-6ff9b0713dfc
10	m <sup>2</sup>	Glasfläche Innenfenster	fa9f6670-3170-4597-92ab-a2fdec7f1451
56	m	Blendrahmen Innenfenster	5e90e94d-6e79-4d9f-854c-fb33f15c033e
2110	kg	Farbe, Annahme: 2-maliger Anstrich; 0,150 l/m <sup>2</sup> je Durchgang; 1,1kg/l	35be6146-5a80-4a9e-a32d-5d05c03a8d5c
6393	m <sup>2</sup>	Tapete	<a href="https://www.heinze.de/pdfdownload/?pdf=/m2/41/63641/pdf/24/21425024px595x842.pdf">https://www.heinze.de/pdfdownload/?pdf=/m2/41/63641/pdf/24/21425024px595x842.pdf</a>
96	m <sup>3</sup>	Gipsputz innen, mittlere Dicke 15mm	b7fb8ab4-e1e2-4a0b-a9c4-abd6cfa6c7f3
701	m <sup>2</sup>	Fliesen, keramisch	a2b5b7c9-db13-4dbd-be23-b0ff9f0cbd98
1137	m <sup>3</sup>	Brettsperrholzdecken und -böden	d8d40f2d-fd1c-4239-ba9f-c1e33fd6f28f
58	m <sup>3</sup>	Beplankung Gipsfaserplatten	6d535792-4351-4d7d-97c6-6d2c3624f3e0
12	m <sup>3</sup>	Brettlaschen zur Modulverbindung aus Dreischichtplatten	f63ac879-fa7d-4f91-813e-e816cbdf1927
91	m <sup>3</sup>	Mineralwolle-Dämmung zwischen Modulboden & -decke	ec17f51c-27ff-4729-977e-cd0e273c2ee3
963	m <sup>3</sup>	Ortbetondecken C30/37, 300mm, 2400 kg/m <sup>3</sup>	b6096c9c-1248-4ce1-9c2d-f4a48aade80f
46224	kg	inkl. 2 % Armierung	e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082;

			EoL: f34a799a-52de-4f69-a623-335f5be207d9
16	Stk.	Betonfertigteiltreppe (2 Treppenhäuser á 4 zu überwindende Stockwerke EG bis 3.OG; 2 Stk. ÖKOBAUDAT-Treppen je Stockwerk)	ab0a0f3c-41f6-4b0a-a12c-f8bd0c8a4a23
496,4	m <sup>2</sup>	Feinsteinzeug	b4a0e610-e038-47d3-b86e-cef013cd7c83
143	m <sup>2</sup>	Fliesen, keramisch	a2b5b7c9-db13-4dbd-be23-b0ff9f0cbd98
2508	m <sup>2</sup>	Industrieparkett	ef72a7e2-7b9b-41a2-8017-cb4e7091a13a
74	m <sup>3</sup>	Trockenestrich Gipsfaser (h=25mm)	a9a79b38-dc2c-4b51-a3cc-cf9fa0d299e7
118	m <sup>3</sup>	Trittschalldämmung EPS (h=40mm)	<a href="https://www.oekobaudat.de/OEKO-BAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d63926ea-8473-4ea7-b965-a7bae6e5e022&amp;version=00.07.000">https://www.oekobaudat.de/OEKO-BAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d63926ea-8473-4ea7-b965-a7bae6e5e022&amp;version=00.07.000</a>
242550	kg	Zementestrich 1500kg/m <sup>3</sup> (h=55mm)	f2053ffa-dd55-47c6-92ed-e98d726db546
5880	m <sup>2</sup>	Trennlage PE-Folie (1x oberhalb Trittschalldämmung, 1x unterhalb)	99792cbc-c5f4-4d2d-bc9e-3790509891a0
9,3	m <sup>3</sup>	Gipsputz innen, mittlere Dicke 15mm	b7fb8ab4-e1e2-4a0b-a9c4-abd6cfa6c7f3
170,5	kg	Farbe Annahme: 2-maliger Anstrich; 0,125 l/m <sup>2</sup> je Durchgang; 1,1kg/l	35be6146-5a80-4a9e-a32d-5d05c03a8d5c
2590	m <sup>2</sup>	Akustikdecke Gipskarton-Lochplatte (Achtung: kein Datensatz inkl. Unterkonstruktion verfügbar)	207cde6a-73be-4ffb-972d-30d3d8619fc3
2590	m <sup>2</sup>	Akustikdecke Holzwoleleichtbauplatten	<a href="https://www.heraklith.hu/sites/hera_hu/files/2018-09/heraklith_homogeneous_board_R.pdf">https://www.heraklith.hu/sites/hera_hu/files/2018-09/heraklith_homogeneous_board_R.pdf</a>
2780	m <sup>2</sup>	EPDM Dampfsperrbahn und Abdichtung	6bdbeaa4-07c5-4213-99c1-2d170333cfdc



227	m <sup>3</sup>	PUR Gefälledämmung WLG 024, 140 mm im Mittel (Umrechnung entspr. Datensatz mit H=120mm)	880e05ea-55c6-4346-a3ea-5af0e5f299e2
375	m <sup>3</sup>	PUR Gefälledämmung WLG 024, 180 mm im Mittel (Umrechnung entspr. Datensatz mit H=120mm)	880e05ea-55c6-4346-a3ea-5af0e5f299e2
129500	kg	Kiesauflast (7,5 cm an Seitenstreifen - Annahme über gesamte Fläche: 5cm; 70 m <sup>3</sup> Umrechnung auf kg entspr. Datensatz mit 1850 kg/m <sup>3</sup> )	3ce61a4e-4d91-4b1d-b675-276be05b9225
687,2	kg	Sanitärkeramik	cace7e48-3fb4-4e11-8cc4-fcefc8b4116a
1700	kg	SML-Rohre (Grauguss)	64e16249-8051-483b-968e-46008a43ef18
335	kg	Raupiano Plus Rohre	94355965-8d24-4e78-a910-9f35b8ae1193
30	kg	Kondensat Abwasserleitungen (Edelstahl)	4d37d8f4-13db-418d-820d-5cf08f050eff
190	kg	TECEflex-Rohre	47165a1f-51e3-4612-b076-facd01e3b236
260	kg	Edelstahlrohre	4d37d8f4-13db-418d-820d-5cf08f050eff
2	Stk	Luft-Wasser-Wärmepumpe 1x 40 kW; 1x 20 kW (Achtung: Ersatzweise Verwendung des Datensatzes für LW-WP 14 kW)	4a08f220-1c52-453c-bf8f-f209586e96c8
26	Stk	Elektrische Durchlauferhitzer 16x3,5 kW, 9x11kW, 1x18kW	4ce46be9-2f9c-4686-aa21-7ebf34783674
290	kg	Heizungsrohre TECEflex	47165a1f-51e3-4612-b076-facd01e3b236
6776,64	kg	Heizkörper	c6de5beb-ffe9-4b5f-aba8-c0c2d3528c58
1	Stk	dezentrales Lüftungssystem (mit WRG) in der Außenwand (Geräte, Montage, Verkabelung u.a.)	efabdf2d-993e-418c-ba86-85a3a91562a2

260	m²	PV-Anlage; 1200 kWh/m²a	e82b43d5-1eba-4f55-b12f-4f2a3f55d380
1000	m	Kabel 1-adrig	16c2cbf7-6cdd-4008-8509-6c2a4dc2c1ef
11450	m	Kabel 3-adrig	ca2a6fc9-8d86-451c-a2d9-592d5288a0ee
6590	m	Kabel 5-adrig	c812d890-4e1c-4293-bc81-6f5bd95d7930
150	m	KABEL CAT 7	ffff2074-fae0-4b5c-b801-af80f5ce633a
100	Stk	Schienensystem für Mensa und Multifunktionsraum	43991578-721b-4f93-8467-a7683060a26b
260	Stk	Klassenzimmerbeleuchtung	43991578-721b-4f93-8467-a7683060a26b
5500	m	Kabel CAT 7	ffff2074-fae0-4b5c-b801-af80f5ce633a
3	Sto ckw erke	Aufzug	a074d0aa-68fd-4105-9b27-e9cf0042cb4d
76211	kW/ a	SUMME jährlichen Endenergiebedarfs des Gesamtgebäudes gem. DIN 18599	2022-2024 (Mix 2020): c869c47e-ce43-45b4-b640-b0cd1746e450 2025-2034 (Mix 2030): e114e6be-30fc-4cce-9e27-d7f8232384cf 2035 - 2044 (Mix 2040): ffeaa284-6f4a-452d-81c9-de28ab3b1dd7 2045 - 2071 (Mix 2050): 42c62a2d-fa52-4d3c-97aa-e766a7bbf1f6
<b>Nicht erfassbare Baustoffe im Rahmen der Ökobilanzen</b>			
2943	m²	Fermacell Estrich-Wabe (h=30mm, 470g/m² Wabengeicht)	kein Datensatz verfügbar
132435	kg	fermacell Wabenschüttung (45kg/m² bei 30mm Wabenhöhe)	kein Datensatz verfügbar
195	m²	Prallwand im Turnbereich	kein Datensatz verfügbar
2	Stk	Kühlung: Split-Klimagerät, Inneneinheit, Außeneinheit, Kälteleitungen, Kondensatleitung, Regelung u.a	kein Datensatz verfügbar