

**Josef Egle, Dipl.-Ing.**

83278 Traunstein, Deutschland

Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Holzhausbau, rechnergestützte Konstruktion und Fertigung im Holz (CAD/CAM/CIM), Luftdichtheit und Gebäudethermografie

Bauaufsichtlich anerkannte Überwachungs- und Zertifizierungsstelle nach Landesbauordnung (BAY34)

Untersuchungsbericht

---

# Biogene Kohlenstoffbindung von Gebäuden in Massivholz

Stand: 2022-03-11

Auftraggeber:

Deutscher Massivholz- und Blockhausverband e.V., München

LIF Project, Finnland

## Inhaltsangabe

1	Einleitung .....	6
2	Zielsetzung .....	7
3	Arbeitsplan .....	7
4	Vorgaben und Definitionen .....	8
5	Beschreibungen	
5.1	Bauart Blockbau einschalig .....	10
5.2	Bauart Blockbau mit Innendämmung .....	11
5.3	Bauart Blockständerbau .....	12
5.4	Bauart Vergleichsgebäude mineralisch .....	13
5.5	Energieversorgung Wärmepumpe .....	13
5.6	Energieversorgung Heizwerk .....	14
6	Bilanzierungen .....	14
6.1	Biogene Kohlenstoffbindung .....	14
6.2	Bauart Blockbau einschalig (Wärmepumpe) .....	15
6.3	Bauart Blockbau einschalig (Heizwerk) .....	16
6.4	Bauart Blockbau mit Innendämmung .....	16
6.5	Bauart Blockständerbau .....	17
7	Ergebnisse und Erkenntnisse	
7.1	CO <sub>2</sub> -Fußabdruck Außenwände .....	17
7.2	CO <sub>2</sub> -Fußabdruck Gebäude .....	19
8	Vorschlag Anrechnung Kohlenstoffsequestrierung	
8.1	Aspekte Umweltproduktdeklaration .....	21
8.2	Aspekte Kohlenstoffbindung .....	21
8.3	Aspekte Kaskadennutzung .....	21
8.4	Aspekte Suffizienz .....	22
8.5	Vorgaben Berechnungsmodell .....	23
8.6	Berechnungsmodell .....	24
8.7	Berechnungsbeispiel Hüllenverfahren .....	24
8.8	Berechnungsbeispiel Bauteilverfahren .....	25
	Literaturangaben .....	26

9	Anlagen	
9.1	Baupläne (informativ)	
9.1.1	Blockhaus 1-schalig .....	27
9.1.2	Blockhaus mit Innendämmung .....	31
9.1.3	Blockständerbauweise .....	35
9.2	GWP Herstellungsprozesse	
9.2.1	Blockbauart 1-schalig original .....	38
9.2.2	Gebäude fiktiv Passivbauart .....	43
9.2.3	Blockbauart mit Innendämmung original .....	50
9.2.4	Gebäude fiktiv Passivbauart .....	57
9.2.5	Blockständerbauart original .....	64
9.2.6	Gebäude fiktiv Passivbauart .....	71
9.3	Wärmeschutz	
9.3.1	Blockbauart 1-schalig original .....	78
9.3.2	Gebäude fiktiv Passivbauart .....	96
9.3.3	Blockbauart mit Innendämmung original .....	114
9.3.4	Gebäude fiktiv Passivbauart .....	132
9.3.5	Blockständerbauart original .....	149
9.3.6	Gebäude fiktiv Passivbauart .....	167

Die gesetzlichen Anforderungen an den Energiebedarf von Gebäuden für Heizung und Warmwasser wurden in den letzten Jahrzehnten stufenweise, dabei in der Gesamtwirkung signifikant verschärft. Ein wesentliches Ziel liegt darin, klimaschädliche Treibhausgase im Gebäudesektor zu reduzieren und so einen Beitrag zur notwendigen globalen Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen zu leisten. Dabei beziehen sich die gesetzlichen Anforderungen derzeit nicht auf den Lebenszyklus von Gebäuden, sondern ausschließlich auf die Nutzungsphase. Weder die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Herstellungsprozess von Baustoffen, auch als „graue Energie“ bezeichnet, noch die klimaschutztechnischen Eigenschaften der Rohstoffe noch weitere Aspekte wie Recycling oder Entsorgung finden Berücksichtigung. Zugleich zeigen Berechnungen und Studien, dass durch die Wahl von Rohstoffen und Baumaterialien die Klimaschutzigenschaften von Gebäuden in erheblicher Weise beeinflusst werden können.

Beim Wachstum von Holz und anderweitigen nachwachsenden Rohstoffen wird der Atmosphäre das Treibhausgas CO<sub>2</sub> entzogen und durch chemische Prozesse („Assimilation“) in Biomasse und Sauerstoff umgewandelt. Wenn bei nachhaltiger Bewirtschaftung von Wäldern die entstehende Biomasse stofflich verwertet wird, bleibt das enthaltene CO<sub>2</sub> über die Lebensdauer eines Bauwerkes oder im Falle von Kaskadennutzung sogar noch darüber hinaus gebunden. Durch diese Bindung ergibt sich ein CO<sub>2</sub>-Senkenpotenzial, das unter allen konstruktiven Werkstoffen im Bauwesen einzigartig ist.

Im vorliegenden Projekt erfolgt eine Gegenüberstellung der Treibhausgasemissionen aus den Herstellungsprozessen („von der Wiege bis zum Werkstor“) mit den Emissionen während der Nutzungsphase für Heizung und Warmwasser. Auch werden die klimaschutztechnischen Auswirkungen untersucht, wenn diese Gebäude fiktiv nicht in Holz, sondern in mineralischer Bauweise im Passivhausstandard errichtet worden wären. Als Datenbasis für die Berechnungen und Vergleiche dienen 3 Gebäude in unterschiedlichen Blockbauarten, die in Niedrigenergiebauweise errichtet wurden. Aus Umweltproduktdeklarationen oder entsprechenden Datenbanken werden zunächst auf Gebäudebasis (Rohbaukonstruktion, Dach, Fenster und Türen sowie Fußbodenaufbauten) die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Herstellungsprozess ermittelt. Anhand des tatsächlichen mittleren jährlichen Energieverbrauchs für Heizung und Warmwasser unter Berücksichtigung der Energieträger und der Anlagentechnik werden die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Nutzungsphase berechnet. Auch wird für alle Gebäude die im Bauwerk befindliche Masse an Rohholz aufsummiert.

Bei Gebäuden nach dem aktuell gültigen Niedrigstenergiestandard wird die Klimaschutzwirkung nicht mehr durch die Nutzungsphase, sondern klar durch die Herstellungsprozesse dominiert. Anders als etwa bei Recycling oder Entsorgung liegt für die Herstellungsprozesse von Baustoffen mittlerweile eine solide Datenbasis vor, sodass vergleichende Betrachtungen hierzu möglich sind. Für die Herstellungsprozesse ergibt sich bei den untersuchten Gebäuden ein CO<sub>2</sub>-Saldo von kleiner als Null. Ein negativer Saldo bedeutet, dass die stofflich gebundene Menge an CO<sub>2</sub> größer ist als die anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen bei den Herstellungsprozessen. Bei den untersuchten Gebäuden dauert es mehrere Jahrzehnte, bis die stofflich gebundene Menge an Kohlendioxid durch die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Nutzungsphase ausgeglichen werden. Wenn als Basiswert nicht die Senkenleistung für sich, sondern die Differenz der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Holzbauart und mineralischen Bauarten für Herstellung und Nutzung herangezogen wird, können die höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen der Mineralbauweise über einen typischen Lebenszeitraum von 80 - 100 Jahren selbst im Passivhausstandard trotz des geringeren Energiebedarfs in der Nutzungsphase nicht mehr ausgeglichen werden.

Unter Beibehaltung derzeit geltender nationaler Regelwerke, dazu EU- und ISO-Normen, wird im vorliegenden Projekt ein Verfahren vorgeschlagen zur Implementierung der CO<sub>2</sub>-Senkenwirkung von nachwachsenden Rohstoffen in Nachweise zum Wärmeschutz. Dazu werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Herstellungs- und Nutzungsphase unter Einhaltung von Randbedingungen verrechnet. Unter Wahrung des Niedrigenergiestandards resultiert hieraus bei der Verwendung klimaschonender Baustoffe in begrenztem Umfang eine Erhöhung der zulässigen Transmissionswärmeverluste. Dies führt zu Suffizienz in Form von geringeren Dämmstoffdicken und letztendlich zu einem etwas reduzierten Bedarf an Baustoffen in thermisch beanspruchten Außenbauteilen. Eine solche Vorgehensweise dient dem Klimaschutz in mehrfacher Hinsicht. Es wird die Verwendung klimaschonender Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen unterstützt, die im Herstellungsprozess im Regelfall deutlich geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen als mineralische oder synthetische Baustoffe. Auf diese Weise erfolgt eine sofortige und unmittelbare Entlastung der Atmosphäre. Verstärkt wird der Effekt zusätzlich durch einen etwas redu-

zierten Bedarf an Baustoffen bzw. Dämmstoffen, der in der Gesamtschau Herstellung und Nutzung dennoch zu keinen überhöhten Treibhausgasemissionen führen kann.

Auch bei Gebäuden in mineralischer Bauweise ist eine Anwendung dieser Berechnungsmethode möglich, wenn in einzelnen Gewerken der thermischen Gebäudehülle Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zum Einsatz kommen.

*The legal requirements for energy demand of buildings in the recent decades have been gradually, thereby significantly increased. Harmful greenhouse gases in the building have to be reduced as a contribute to the necessary global reduction of CO<sub>2</sub> emissions. The legal requirements currently do not relate to the life cycle of buildings, but exclusively to the use phase. Neither the CO<sub>2</sub> emissions in the manufacturing process of building materials, also called "gray energy", nor the climate protection properties of raw materials nor other aspects such as potential for recycling or disposal are considered. At the same time calculations and studies show that the choice of suitable raw materials are the base of climate protection properties.*

*During the growth of wood and other renewable raw materials, the greenhouse gas CO<sub>2</sub> is removed from the atmosphere and converted into biomass and oxygen by chemical processes ("assimilation"). If sustainable biomass is used for the sustainable management of forests, the contained CO<sub>2</sub> remains bound over the lifespan of a building or, if reused, even beyond that. This binding results in a CO<sub>2</sub> sink potential, which is unique among all construction materials in the construction industry.*

*In the present project, a comparison of the greenhouse gas emissions from the production processes ("from cradle to gate") with the emissions during utilization for heating and hot water is carried out. The effects of climate protection on the use of different building materials are also examined.*

*In buildings according to the current lowest energy standard the climate protection effect is no longer dominated by the utilization phase, but clearly by the manufacturing processes. Unlike when it comes to recycling or disposal, the construction processes of building materials meanwhile have a solid database, so that comparative considerations are possible. For the manufacturing processes, a carbon footprint of less than zero could be accounted onto the regarded units in solid wood. A negative balance means that the storage of CO<sub>2</sub> in the building parts is more than the CO<sub>2</sub> emissions within manufacturing processes. The studied buildings show, that this storage of carbon dioxide can be compensated not till then a few decades. If the base value is not the storage capacity, but the difference between the CO<sub>2</sub> emissions from wood and typical mineral construction methods, the offset cannot be reached within lifetime of a building.*

*This project proposes a procedure for implementing the CO<sub>2</sub> storage effects of renewable raw materials in heat protection certificates. For this purpose, the CO<sub>2</sub> emissions from production and utilization phase are offset in compliance with boundary conditions. While preserving the low energy standards, this results in a limited increase in the permissible transmission heat losses when using climate-friendly building materials. This leads to slightly lower insulation thicknesses and ultimately to a slightly reduced demand for building materials in thermally stressed exterior components in the sense of sufficiency. Such an approach serves climate protection in several ways. It supports the use of climate-friendly building materials from renewable raw materials. This effect is additionally reinforced by a lowered demand for building or insulating material, which nevertheless cannot lead to excessive greenhouse gas emissions in the sum of production and utilization.*

*Even for mineral buildings an application of this calculation method is possible, if some construction units, e.g. for roofs, are produced with renewable raw materials.*

## 1. Einleitung

Nach einem aktuellen IPCC-Bericht aus 2022 [1] sind rasche und weitreichende Änderungen auch im Gebäudesektor erforderlich, damit ein weiterer Anstieg der Erderwärmung über die Zielmarke von 1,5 ° C noch begrenzt werden kann. Die Anforderungen an den Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser von Gebäuden wurden in den letzten Jahrzehnten stufenweise, dabei in der Gesamtwirkung erheblich verschärft. Ein wesentliches Ziel liegt darin, schädliche Treibhausgase im Gebäudesektor soweit als möglich zu minimieren. In den öffentlich-rechtlichen Nachweisen zum Wärmeschutz in den meisten Ländern Europas, auch nach der derzeit gültigen europäischen Gebäuderichtlinie [2], liegt der Fokus ausschließlich auf der Nutzungsphase von Gebäuden. CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Herstellungsprozessen, weitere klimaschutztechnische Auswirkungen bei der Auswahl von Baustoffen sowie Aspekte von Recycling und Wiederverwertung bleiben unberücksichtigt.

Neu zu errichtende Gebäude zeichnen sich durch einen geringen Energiebedarf für Heizung und Warmwasser aus. Zusätzlich nimmt der Anteil erneuerbarer Energien bei der Versorgung dieser Gebäude stetig zu. Dies führt dazu, dass der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Gebäuden maßgeblich nicht mehr durch die Nutzungsphase, sondern durch die Herstellungsprozesse bestimmt wird. Zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes von Baustoffen und Gebäuden können Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declaration EPD) herangezogen werden, die für eine zunehmende Zahl von Baustoffen und Bauprodukten zur Verfügung stehen. Nach den geltenden Bestimmungen müssen hierbei die Module A1-A3 nach EN 15804 [3] („von der Wiege bis zum Werkstor“) verpflichtend deklariert werden. Alle weiteren Module für Baustelle, Nutzung, Rückbau und evtl. Recycling oder stoffliche Wiederverwertung können auf freiwilliger Basis, müssen jedoch nicht ausgewiesen sein. Bei der Sichtung von EPDs ist rasch zu erkennen, dass gerade in den Modulen A1-A3 außerordentlich große Unterschiede beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bestehen, ausgedrückt durch den Kennwert Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential GWP).

Bei der Erstellung von EPDs müssen zahlreiche Randparameter wie beispielsweise Transportstrecken, Transportmittel oder Art der eingesetzten Energie für Verarbeitungsprozesse definiert werden. Je nach Betrachtungsweise können sich somit deutlich unterschiedliche Ergebnisse einstellen. Ein weiterer Nachteil von EPDs liegt darin, dass Aspekte wie Instandhaltung, Reparatur, Ersatz oder Erneuerung (Module B2 - B5 nach EN 15804) vielfach nicht materialbezogen, sondern bauteilbezogen zu betrachten sind. Exemplarisch bei einem Stück Holz macht es in Bezug auf Dauerhaftigkeit einen großen Unterschied, ob es als Zaunpfosten ins Erdreich geschlagen oder als Deckenbalken im geschützten Gebäudeinnern verarbeitet wird.

Unstrittig und in der EN 16449 [4] klar definiert ist hingegen die Umwandlung von CO<sub>2</sub> in Biomasse und Sauerstoff beim Wachstum von Bäumen und Pflanzen. Diese „Einstockung“ von CO<sub>2</sub> in Festkörperform währt über die gesamte Lebensdauer eines Bauteiles und kann sich im Falle von stofflicher Wiederverwertung im Sinne einer Kaskadennutzung noch zusätzlich verlängern. Der Kohlenstoffanteil von Holz liegt bei 50 %. Entsprechend den molaren Massen von Kohlendioxid und Kohlenstoff werden der Atmosphäre je kg Biomasse (darrtrocken) 1,87 kg CO<sub>2</sub> entzogen.

## 2. Zielsetzung

Mit den vorliegenden Untersuchungen soll nachgewiesen werden, dass unter Beachtung von Baustoffauswahl und Anlagentechnik Gebäude in Massivholzbauart, auch wenn sie keinen Passivhausstandard erreichen und einen etwas höheren Energiebedarf für Heizung und Warmwasser aufweisen, in der Gesamtschau aus Herstellung und Nutzung deutlich geringere Treibhausgasemissionen verursachen als fiktive Vergleichsgebäude in mineralischer Bauart im Passivhausstandard. Die Vergleichsbeobachtungen beziehen sich dabei auf einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren in der Gesamtschau Materialherstellung (Module A1-A3 nach EN 15804) und Nutzung (Modul B1).

Zu diesem Zweck werden für drei markttypische Massivholzbauarten im Ausbauhausstadium die CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. -Senken für den Herstellungsprozess der Baustoffe und für die Nutzungsphase bilanziert. Die Ergebnisse werden mit Berechnungen verglichen, wenn diese Gebäude fiktiv in mineralischer Bauweise mit passivhaustauglichen U-Werten errichtet würden.

Anhand der Untersuchungsergebnisse sollen ein Verfahren entwickelt werden für eine sinnvolle Anrechenbarkeit der langfristigen CO<sub>2</sub>-Senkenleistung von Gebäuden - auch unter Berücksichtigung des Aspektes Kaskadennutzung - in öffentlich-rechtlichen Nachweisen zum Wärmeschutz.

Die Ergebnisse des vorliegenden Projekts sollen weiterhin als Diskussionsgrundlage dienen, ob und in welcher Weise eine Europäische technische Zulassung (ETA) für Blockwände mit dem Schwerpunkt biogene Kohlenstoffbindung und Kaskadennutzung angestrebt werden könnte.

## 3. Arbeitsplan

- 3a Anforderungskatalog und Auswahl von drei Bestandsgebäuden in den markttypischen Blockbauarten 1-schalig, Außenwände mit Zusatzdämmung innen und Blockständerbauweise. Ermittlung der Massen und der verwendeten Baustoffe für die Gebäude im Ausbaustadium (Außen- Innenwände sowie Dächer mit allen Bauteilschichten, Fenster und Außentüren, Tragkonstruktion Zwischendecke)
- 3b Aufbau einer Datenbank für Umweltproduktdeklarationen benötigter Baustoffe und Bauteile.
- 3c Bilanzierungen auf Gebäudeebene für
  - GWP Herstellungsprozesse (Module A1-A3 nach EN 15804)
  - GWP Nutzungsphase (Modul B1 nach EN 15804)
- 3d Vergleichsberechnungen Annahme fiktives Gebäude gleicher Größe und Architektur in mineralischer Bauweise mit thermischer Gebäudehülle im Passivhausstandard
- 3e Ermittlung des rechnerischen Heizenergiebedarfs nach EN ISO 6946 [5] für alle Gebäudevarianten
- 3f Auswertungen und Gegenüberstellungen der Ergebnisse Holzbauarten sowie vergleichend Passivhausbauweise
- 3g Erarbeitung eines Vorschlages zur Anrechnung des in den Außenwänden eingelagerten biogenen Kohlenstoffs in öffentlich-rechtlichen Nachweisen zum Wärmeschutz
- 3h Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion weitere Vorgehensweise

#### 4. Vorgaben und Definitionen

- 4a Die drei untersuchten Objekte sind real existierende Gebäude in den Bauarten 1-schaliger Holzblockbau (Standort Flachau, Österreich), Blockaußenwände mit raumseitiger Dämmung und Bekleidung (Standort Erzgebirge, Deutschland) und Blockständerbauweise (Standort Coburg, Deutschland).
- 4b Für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential GWP) für Bauteile und Gebäude wurde größtenteils auf Umweltproduktdeklarationen (EPDs) und Baustoffe aus der Datenbank oekobaudat.de [6] zurückgegriffen. Für wenige Bauteile (z.B. Verbindungsmittel und Glaselemente) wurden Werte aus der Datenbank baubook.at [7] verwendet.
- 4c Für das GWP werden die Module A1-A3 nach EN 15804 herangezogen („von der Wiege bis zum Werkstor“). Die Beschreibung dieser Module ist für Erstellung von EPDs verpflichtend, somit liegen hier vollständige Informationen vor. In Bezug auf Treibhausgase ergeben sich in diesen Modulen die markantesten Unterschiede zwischen verschiedenen Baustoffen und Bauarten.
- 4d Alle Berechnungen zu Umweltkennwerten erfolgen ab Oberkante Bodenplatte bzw. Keller.
- 4e Erfasst werden die Gewerke Außenwände, Innenwände und Dach mit allen Bauteilschichten, Zwischendecken (hier tragende Konstruktion ohne Fußbodenaufbauten) sowie Glaselemente. Dem Grunde nach werden somit diejenigen Gewerke erfasst, die dem Status eines „Ausbauhauses“ entsprechen.
- 4f Bei der Dachkonstruktion wird unterschieden in gedämmte Dachfläche und Vordach. Es werden alle flächigen Bauteile erfasst. Einzelbauteile wie z.B. Pfetten, Stützen werden nicht berechnet.
- 4g Nebengebäude (z.B. Garagen), Anbauten (z.B. Balkone) und Bauteile außerhalb der Gebäudehülle mit Ausnahme des Vordaches werden nicht erfasst.
- 4h Die drei untersuchten Gebäude weisen unterschiedliche Konstruktionen und Baustoffe auf. Sowohl die Umweltkennwerte als auch die energetischen Kennwerte entsprechen der tatsächlich hergestellten Baukonstruktion.
- 4i Die Umweltkennwerte und energetischen Kennwerte der drei untersuchten Gebäude werden mit einem fiktiven Gebäude in mineralischer Bauweise in gleicher Größe und Architektur verglichen. Außenwände und Dach dieses fiktiven Gebäudes entsprechen dem Passivhausstandard und weisen U-Werte von etwa  $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf.
- 4j Für die drei realen Gebäude sowie für das fiktive Vergleichsgebäude wird für den Bodenaufbau im EG einheitlich eine Konstruktion angenommen mit U-Wert  $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- 4k Die untersuchten real existierenden Gebäude sind mit Holzfenstern ausgestattet. Für die energetischen Berechnungen werden die tatsächlich vorhandenen U-Werte dieser Elemente herangezogen.
- 4l Beim fiktiven Vergleichsgebäude wird von marktgängigen Kunststofffenstern mit 3-Scheiben-Isolierverglasung  $U_g = 0,50 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  und  $U_{W\text{-Wert}} = 0,80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  ausgegangen.
- 4m Die Hauseingangstüren sind in den Fensterflächen addiert und nicht separat erfasst.
- 4n Um die energetischen Auswirkungen von den drei untersuchten Gebäuden und den fiktiven Gebäuden vergleichen zu können, wird für Heizung und Warmwasser bei allen Gebäuden die Verwendung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe angenommen.



- 4o Wiederum für Vergleichszwecke werden bei dem Blockhaus mit einschaligen Außenwänden ergänzend die Auswirkungen untersucht, wenn anstelle einer Luft-Wasser-Wärmepumpe eine Energieversorgung durch ein Heizwerk (Nah-/Fernwärme) erfolgt, welches mit nachwachsenden Energieträgern versorgt wird.
- 4p Weitere mögliche Bestandteile der Gebäudetechnik wie mechanische Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, dezentrale Abluftanlagen, Solarthermie oder Photovoltaik werden in die Vergleiche nicht einbezogen.
- 4q Berechnungen zum Energiebedarf von Gebäuden wurden mit der Software „ZUB Helena Ultra v7.100“ [8] durchgeführt. Die Berechnungen sind konform zu den Vorgaben EN ISO 6946.
- 4r Kennzahlen für die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Energieträgern und Heizungsanlagen in der Einheit g CO<sub>2</sub>-Äquivalente je kWh thermische Leistung wurden der Anlage 9 Tabelle Punkt 3 des Gebäudeenergiegesetzes GEG [9] entnommen.
- 4s Zum Zweck der Vergleichbarkeit werden alle energetischen Berechnungen einheitlich auf dem Klimastandort Region 4 Potsdam (Referenzklima für Deutschland) bezogen (Heizgradtagszahl 69,6 kWh/a).
- 4t Für Wärmebrücken wird für alle Bauarten einschließlich des Vergleichsgebäudes in mineralischer Passivhausbauart ein pauschaler Wärmebrückenzuschlag von 0,01 W/K in Anlehnung an Ergebnisse von artähnlichen Nachweisen nach EN ISO 10211 [10] verwendet.

## 5. Beschreibungen

### 5.1 Bauart Blockbau einschalig



Abbildung 1	
Abbildung 2	
Baujahr, Standort	2020, A - 5542 Flachau
Grundfläche EG + DG	193,60 m <sup>2</sup>
Geschosse	EG, ausgebauter DG

Tabelle 1: Abbildungen und Grunddaten Bestandsgebäude in 1-schaliger Blockbauart

lfd.Nr.	Bauteil	Beschreibung	Fläche [m <sup>2</sup> ]	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
1	Außenwand	Balkenschichtholz Kiefer 240 mm	182,90	0,496
2	Innenwand	Balkenschichtholz Kiefer 120 mm	179,86	-
3	Zwischendecke	Deckenbalken 120 x 220 mm, Sichtschalung Nut-Feder 40 mm	92,80	-
4	Dach gedämmt	Sichtsparren 100 x 140 mm, Sichtschalung N/F 19 mm, Dampfbremse, Dachdämmung Einblasdämmung Cellulose in 2 Lagen 2 x 160 mm mit Zwischensparren 160 mm, Rauschalung 24 mm, Dachunterdeckbahn, Lattung 2-fach, Eindeckung Tonpfannen	119,65	0,122
5	Vordach	Dachsparren 100 x 160 mm, Sichtschalung N/F 19 mm, Dachunterdeckbahn, Lattung 2-fach, Eindeckung Tonpfannen	45,20	-
6	Glaselemente	Fichtenholz, 3-Scheiben-Isolierglas	33,34	0,80

Tabelle 2: Flächen und U-Werte Außenbauteile Bestandsgebäude in 1-schaliger Blockbauart

## 5.2 Bauart Blockbau mit Innendämmung

Abbildung 1	
Abbildung 2	
Baujahr, Standort	2015, D - 09474 Crottendorf / Erzgebirge
Grundfläche EG + DG	271,50 m <sup>2</sup>
Geschosse	EG, ausgebautes DG

Tabelle 3: Abbildungen und Grunddaten Bestandsgebäude in Blockbauart mit Innendämmung

lfd.Nr.	Bauteil	Beschreibung	Fläche [m <sup>2</sup> ]	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
1	Außenwand	von außen nach innen Balkenschichtholz Fichte 88 mm, Holzriegel mit Gefachdämmung Mineralfaser 145 mm, Schalungsbahn, Installationsebene 45 mm, Innenschalung N/F 18 mm	208,29	0,281
2	Innenwand	Holzriegel mit Gefachdämmung Holzfaser, beidseitig OSB 15 mm und Gipskarton 12,5 mm	160,99	-
3	Zwischendecke	Balken 88x192 mm, Sichtschalung N/F 18 mm	120,92	-
4	Dach gedämmt	Sichtsparren 88 x 192 mm, Sichtschalung N/F 18 mm, Dampfbremse, Dachdämmung PUR-Dämmplatten 140 mm, Lattung 2-fach, Eindeckung Tonpfannen	152,56	0,190
5	Vordach	Sichtsparren 88 x 192 mm, Sichtschalung N/F 18 mm, Dachunterspannbahn, Kontersparren 140 mm, Lattung 2-fach, Eindeckung Tonpfannen	56,28	-
6	Glaselemente	Fichtenholz, 3-Scheiben-Isolierglas	41,70	0,99

Tabelle 4: Flächen und U-Werte Außenbauteile Bestandsgebäude in Blockbauart mit Innendämmungeweise

### 5.3 Bauart Blockständerbau

Abbildung 1	
Abbildung 2	
Baujahr, Standort	2017, D - 96269 Großheirath
Grundfläche EG	191,6 m <sup>2</sup> (ohne überdachte Terrasse)
Geschosse	EG, teilweise Speicher

Tabelle 5: Abbildungen und Grunddaten Bestandsgebäude in Blockständerbauart

lfd.Nr.	Bauteil	Beschreibung	Fläche [m <sup>2</sup> ]	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
1	Außenwand	Blockbalken Vollholz 50 mm, Unterdeckbahn, Holzriegelkonstruktion mit Gefachdämmung Holzfaser 180 mm, OSB-Platte 15 mm, Installationsebene gedämmt mit Holzfaser 60 mm, Gipskarton 12,5 mm	232,09	0,168
2	Innenwand	Holzriegel 120 mm mit Gefachdämmung Holzfaser 60 mm, einseitig Bekleidung OSB 15 mm, beidseitig Gipskarton 12,5 mm	162,51	-
3	Zwischendecke	Balken 120x220 mm, Sichtschalung N/F 27 mm	76,00	-
4	Dach gedämmt	Sichtsparren 100 x 200 mm, Sichtschalung N/F 19 mm, Dampfbremse, Dachdämmung Holzfaser 180 mm mit Kontersparren 180 mm, Dachunterdeckplatte Holzfaser 22 mm, Lattung 2-fach, Eindeckung Tonpfannen	213,20	0,198
5	Vordach	Dachsparren 100 x 180 mm, Sichtschalung N/F 19 mm, Dachunterspannbahn, Lattung 2-fach, Eindeckung Tonpfannen	40,38	-
6	Glaselemente	Kiefernholz, 3-Scheiben-Isolierglas	55,38	0,85

Tabelle 6: Flächen und U-Werte Außenbauteile Bestandsgebäude in Blockständerbauart

#### 5.4 Bauart Vergleichsgebäude mineralisch

Für alle untersuchten Objekte wird zu Vergleichszwecken ein fiktives Gebäude gleicher Größe und Architektur in mineralischer Passivhausbauart verwendet. Auch hierzu nachstehend die Baubeschreibung der verwendeten Gewerke:

lfd.Nr.	Bauteil	Beschreibung	U-Wert [W/m²K]
1	Außenwand	Innenputz Kalk-Gips, Kalksandstein Rohdichte 1200 kg/m³ Dicke 175 mm, Wärmedämmverbundsystem mit expandiertem Polystyrol 240 mm und Kunstharz-Außenputz	0,136
2	Innenwand	Kalksandstein Rohdichte 1200 kg/m³, Dicke 175 mm, beidseitig Kalk-Gips-Putz	-
3	Zwischendecke	Stahlbetondecke 180 mm mit unterseitigem Verputz	-
4	Dach gedämmt	Gipskarton, Lattung 30 mm, Dampfbremse, Dachsparren 80 x 280 mm mit Dämmung Mineralfaser, Dachunterspannbahn, Lattung 2-fach, Eindeckung Tonpfannen	0,142
5	Vordach	Dachsparren 80 x 260 mm, Sichtschalung N/F 19 mm, Dachunterspannbahn, Lattung 2-fach, Eindeckung Tonpfannen	-
6	Glaselemente	Kunststoff mit 3-Scheiben-Isolierglas $U_g = 0,50$	0,80

*Tabelle 7: U-Werte Außenbauteile fiktives Vergleichsgebäude mineralische Bauart im Passivhausstandard*

#### 5.5 Energieversorgung Wärmepumpe

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Energieversorgung von Gebäuden hängen stark vom Energieträger und der Art der Energieversorgung ab. Im vorliegenden Projekt werden für mehrere Bauarten Bilanzierungen von Herstellungsprozessen und Nutzungsphase über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren vorgenommen. Für einheitliche und vergleichbare Bewertungen werden bei allen untersuchten Gebäuden zur Bereitstellung der Energie für Heizung und Warmwasser die gleichen klimatischen Bedingungen sowie die gleiche Heizungsart definiert. Es werden Klima 4 Potsdam nach GEG und der Einsatz einer Luft-Wasser-Wärmepumpe unterstellt. Für die Gebäudebeheizung werden Flächenheizungen, etwa Fußbodenheizungen angenommen mit einer Vorlauftemperatur von 35 Grad Celsius. Es gelten folgende Vorgaben:

Energieversorgung Heizung / Warmwasser:	Luft-Wasser-Wärmepumpe
Energiebedarf Gebäudebeheizung:	laut Berechnungen
Energiebedarf Warmwasseraufbereitung:	laut Berechnungen (12,5 kWh/m² Nutzfläche)
Jahresarbeitszahl Luft-Wasser-Wärmepumpe:	2,5
CO <sub>2</sub> -Emissionen Haushaltsstrom (nach GEG):	560 g CO <sub>2,eq</sub> / kWh <sub>thermisch</sub>
CO <sub>2</sub> -Emissionen Betrieb Wärmepumpe:	560 g CO <sub>2,eq</sub> / kWh / 2,5 = 224 g CO <sub>2,eq</sub> / kWh
Gradtagezahlfaktor für Potsdam:	69,6 kWh/a

## 5.6 Energieversorgung Heizwerk

Für die Bauart Blockaußenwände 1-schalig wird ergänzend zu Luft-Wasser-Wärmepumpe eine Beheizung durch ein Heizwerk mit erneuerbarem Brennstoff geprüft. Dann gelten wiederum nach [ ] folgende Vorgaben:

Energieversorgung Heizung / Warmwasser: Heizwerk erneuerbar  
 CO<sub>2</sub>-Emissionen Heizwerk: 60 g CO<sub>2,eq</sub>/ kWh

Alle weiteren Werte bleiben unverändert.

## 6. Bilanzierungen

Bilanzierungen des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Herstellungsprozesse (Kennwert Global Warming Potential GWP aus Umweltproduktdeklarationen), Nutzungsphase (CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren Heizungsanlage) sowie die im Bauwerk stofflich gebundenen Menge an Kohlenstoff (EN 16449) erfolgen für das Gebäude im Ausbaustadium. Ergänzend werden ausschließlich die Außenwände bilanziert. Sowohl für Ausbauhaus wie auch für Außenwände werden Vergleiche durchgeführt mit einem fiktiven Gebäude in mineralischer Bauart im Passivhausstandard. In die Bilanzierungen werden für das GWP die Herstellungsprozesse der Baustoffe (Module A1-A3) sowie die Nutzungsphase (Modul B1) einbezogen. Nur die Module A1-A3 nach EN 15804 müssen in Umweltproduktdeklarationen verpflichtend beschrieben werden. Alle weiteren Module sind nicht verpflichtend, sodass hierin objektive Vergleiche nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich sind. Für die Nutzungsphase (Modul B1) wird der berechnete Endenergiebedarf unter Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der gewählten Heizungsanlage als Datengrundlage verwendet.

Eine Besonderheit ergibt sich bei Modul A1 (Rohstoffgewinnung). Bei Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen beinhaltet dieser Wert auch die biogene Kohlenstoffbindung. Beim Kennwert GWP ergeben sich deshalb hierfür negative Werte.

### 6.1 Biogene Kohlenstoffbindung

Die Kohlenstoffsequestrierung beim Wachstum von Holz ist in der EN 16449 anhand der molaren Massen von Kohlendioxid, Sauerstoff und Kohlenstoff sowie einem Kohlenstoffanteil von 50 % bei Holz im darrtrockenen Zustand beschrieben. Ausgehend vom Beispiel Nadelholz mit Rohdichte 460 kg/m<sup>3</sup> bei einem Feuchtegehalt von 12 % ergeben sich folgende Rechenansätze:

Sauerstoff [O]	15,99 g/mol
Kohlenstoff [C]	12,01707 g/mol
Kohlenstoffdioxid [CO <sub>2</sub> ]	44,0087 g/mol
Holzzuwachs:	1 kg C $\approx$ 44/12 $\approx$ 3,87 kg CO <sub>2</sub>
Anteil C von Holz:	50 %
Biogener Anteil CO <sub>2</sub> Holz	1 kg Holz = 1,83 kg CO <sub>2</sub>
Darrrohdichte Nadelholz:	420 kg/m <sup>3</sup>
Kohlenstoffbindung:	$44/12 * 0,50 \text{ kg CO}_2/\text{kg} * 460 \text{ kg/m}^3 / 1,12 = 752,9 = 753 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$

Tabelle 8: Biogene Kohlenstoffbindung Beispiel Fichtenholz

## 6.2 Bauart Blockbau einschalig (Wärmepumpe)

Ergebnisse in Tabellenform (detaillierte Berechnungen Anlagen 9.2.1, 9.2.2, 9.3.1 und 9.3.2)

lfd.Nr.	Inhalt	Einheit	Bauart original	Bauart Passivhaus
1	GWP A1-A3 Gebäude gesamt	t CO <sub>2,eq</sub>	- 60,442	23,430
2	GWP A1-A3 Außenwand 1 m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2,eq</sub> / m <sup>2</sup>	-172,144	56,870
3	Holzmenge Gebäude atro	m <sup>3</sup>	114,799	7,631
4	Holzmenge Außenwand atro	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,221	0
5	biogene Kohlenstoffbindung Gebäude	t CO <sub>2</sub>	86,44	5,746
6	biogene Kohlenstoffbindung AW	t CO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	0,166	0
7	U-Wert Ø Gebäude	W/(m <sup>2</sup> K)	0,340	0,194
8	U-Wert Außenwand (AW)	W/(m <sup>2</sup> K)	0,496	0,136
9	Endenergiebedarf Gebäude	kWh/a	5.594,10	4.328,20
10	spez. Energiebedarf Außenwand pro Jahr	kWh/(m <sup>2</sup> a)	34,522	9,466
11	spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen Wärmepumpe	kg CO <sub>2</sub> / kWh	0,224	0,224
12	jährliche CO <sub>2</sub> -Emissionen Gebäude	t CO <sub>2</sub> / a	1,253	0,970
13	jährliche CO <sub>2</sub> -Emissionen Außenwand	kg CO <sub>2</sub> / (m <sup>2</sup> a)	7,733	2,120
14	GWP A1-A3 + 50 Jahre Nutzung Gebäude	t CO <sub>2,eq</sub>	2,208	71,93
15	GWP A1-A3 + 50 Jahre Nutzung AW	kg CO <sub>2,eq</sub> / m <sup>2</sup>	214,506	162,87
16	Gleichstand GWP A1-A3 + Nutzung Gebäude original zu Passivhaus	Jahre	296	
17	Gleichstand GWP A1-A3 + Nutzung Außenwand original zu Passivhaus	Jahre	41	

*Tabelle 9: Bilanzen Wärmeschutz und CO<sub>2</sub> Vergleich Blockbauart 1-schalig und Passivhausbauart mineralisch mit Heizung Luft-Wasser-Wärmepumpe*

Berechnungsformeln (gültig auch für die Tabellen 10 - 12):

- [5]: [3] \* 753 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> / 1000 kg/t  
 [6]: [4] \* 753 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> / 1000 kg/t  
 [10]: [8] \* 69,6 kWh/a  
 [12]: [9] \* [11] / 1000 kg/t  
 [13]: [10] \* [11]  
 [14]: [1] + ([12] \* 50 a)  
 [15]: [2] + ([13] \* 50 a)  
 [16]: ((1<sub>Passiv</sub>) - [1<sub>Orig</sub>]) / (([12<sub>Orig</sub>] - [12<sub>Passiv</sub>])  
 [17]: (([2<sub>Passiv</sub>] - [2<sub>Orig</sub>]) / (([13<sub>Orig</sub>] - [13<sub>Passiv</sub>]))

### 6.3 Bauart Blockbau einschalig (Heizwerk)

Ergebnisse in Tabellenform (detaillierte Berechnungen Anlagen 9.2.1, 9.2.2, 9.3.1 und 9.3.2)

lfd.Nr.	Inhalt	Einheit	Bauart original	Bauart Passivhaus
1	GWP A1-A3 Gebäude gesamt	t CO <sub>2,eq</sub>	- 60,442	23,430
2	GWP A1-A3 Außenwand 1 m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2,eq</sub> / m <sup>2</sup>	-172,144	56,870
3	Holzmenge Gebäude atro	m <sup>3</sup>	114,799	7,631
4	Holzmenge Außenwand atro	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,221	0
5	biogene Kohlenstoffbindung Gebäude	t CO <sub>2</sub>	86,44	5,746
6	biogene Kohlenstoffbindung AW	t CO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	0,166	0
7	U-Wert Ø Gebäude	W/(m <sup>2</sup> K)	0,340	0,194
8	U-Wert Außenwand (AW)	W/(m <sup>2</sup> K)	0,496	0,136
9	Endenergiebedarf Gebäude	kWh/a	5.594,10	4.328,20
10	spez. Energiebedarf Außenwand pro Jahr	kWh/(m <sup>2</sup> a)	34,522	9,466
11	spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen Heizwerk	kg CO <sub>2</sub> / kWh	0,060	0,060
12	jährliche CO <sub>2</sub> -Emissionen Gebäude	t CO <sub>2</sub> / a	0,336	0,260
13	jährliche CO <sub>2</sub> -Emissionen Außenwand	kg CO <sub>2</sub> / (m <sup>2</sup> a)	2,071	0,568
14	GWP A1-A3 + 50 Jahre Nutzung Gebäude	t CO <sub>2,eq</sub>	- 43,642	36,43
15	GWP A1-A3 + 50 Jahre Nutzung AW	kg CO <sub>2,eq</sub> / m <sup>2</sup>	- 68,594	85,270
16	Gleichstand GWP A1-A3 + Nutzung Gebäude original zu Passivhaus	Jahre	1.104	
17	Gleichstand GWP A1-A3 + Nutzung Außenwand original zu Passivhaus	Jahre	152	

Tabelle 10: Bilanzen Wärmeschutz und CO<sub>2</sub> Vergleich Blockbauart 1-schalig und Passivhausbauart mineralisch mit Heizung aus Heizwerk (nachwachsende Heizstoffe)

### 6.4 Bauart Blockbau mit Innendämmung

Ergebnisse in Tabellenform (detaillierte Berechnungen Anlagen 9.2.3, 9.2.4, 9.3.3 und 9.3.4)

lfd.Nr.	Inhalt	Einheit	Bauart original	Bauart Passivhaus
1	GWP A1-A3 Gebäude gesamt	t CO <sub>2,eq</sub>	- 23,886	26,233
2	GWP A1-A3 Außenwand 1 m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2,eq</sub> / m <sup>2</sup>	-77,559	56,870
3	Holzmenge Gebäude atro	m <sup>3</sup>	53,949	9,655
4	Holzmenge Außenwand atro	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,111	0
5	biogene Kohlenstoffbindung Gebäude	t CO <sub>2</sub>	40,624	7,270
6	biogene Kohlenstoffbindung AW	t CO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	0,084	0
7	U-Wert Ø Gebäude	W/(m <sup>2</sup> K)	0,320	0,234
8	U-Wert Außenwand (AW)	W/(m <sup>2</sup> K)	0,281	0,136
9	Endenergiebedarf Gebäude	kWh/a	6.723,30	5.816,50
10	spez. Energiebedarf Außenwand pro Jahr	kWh/(m <sup>2</sup> a)	19,558	9,466
11	spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen Wärmepumpe	kg CO <sub>2</sub> / kWh	0,224	0,224
12	jährliche CO <sub>2</sub> -Emissionen Gebäude	t CO <sub>2</sub> / a	1,506	1,303
13	jährliche CO <sub>2</sub> -Emissionen Außenwand	kg CO <sub>2</sub> / (m <sup>2</sup> a)	4,381	2,120
14	GWP A1-A3 + 50 Jahre Nutzung Gebäude	t CO <sub>2,eq</sub>	51,414	91,383
15	GWP A1-A3 + 50 Jahre Nutzung AW	kg CO <sub>2,eq</sub> / m <sup>2</sup>	141,491	162,87
16	Gleichstand GWP A1-A3 + Nutzung Gebäude original zu Passivhaus	Jahre	247	
17	Gleichstand GWP A1-A3 + Nutzung Außenwand original zu Passivhaus	Jahre	59	

Tabelle 11: Bilanzen Wärmeschutz und CO<sub>2</sub> Vergleich Blockbauart mit Innendämmung und Passivhausbauart mineralisch mit Heizung Luft-Wasser-Wärmepumpe



## 6.5 Bauart Blockständerbau

Ergebnisse in Tabellenform (detaillierte Berechnungen Anlagen 9.2.5, 9.2.6, 9.3.5 und 9.3.6)

lfd.Nr.	Inhalt	Einheit	Bauart original	Bauart Passivhaus
1	GWP A1-A3 Gebäude gesamt	t CO <sub>2,eq</sub>	- 30,615	27,760
2	GWP A1-A3 Außenwand 1 m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2,eq</sub> / m <sup>2</sup>	-64,805	56,870
3	Holzmenge Gebäude atro	m <sup>3</sup>	134,222	11,389
4	Holzmenge Außenwand atro	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	0,275	0
5	biogene Kohlenstoffbindung Gebäude	t CO <sub>2</sub>	101,07	8,576
6	biogene Kohlenstoffbindung AW	t CO <sub>2</sub> / m <sup>2</sup>	0,207	0
7	U-Wert Ø Gebäude	W/(m <sup>2</sup> K)	0,221	0,189
8	U-Wert Außenwand (AW)	W/(m <sup>2</sup> K)	0,168	0,136
9	Endenergiebedarf Gebäude	kWh/a	5.831,60	5.382,80
10	spez. Energiebedarf Außenwand pro Jahr	kWh/(m <sup>2</sup> a)	11,693	9,466
11	spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen Wärmepumpe	kg CO <sub>2</sub> / kWh	0,224	0,224
12	jährliche CO <sub>2</sub> -Emissionen Gebäude	t CO <sub>2</sub> / a	1,306	1,206
13	jährliche CO <sub>2</sub> -Emissionen Außenwand	kg CO <sub>2</sub> / (m <sup>2</sup> a)	2,619	2,120
14	GWP A1-A3 + 50 Jahre Nutzung Gebäude	t CO <sub>2,eq</sub>	34,685	133,76
15	GWP A1-A3 + 50 Jahre Nutzung AW	kg CO <sub>2,eq</sub> / m <sup>2</sup>	103,935	162,870
16	Gleichstand GWP A1-A3 + Nutzung Gebäude original zu Passivhaus	Jahre	584	
17	Gleichstand GWP A1-A3 + Nutzung Außenwand original zu Passivhaus	Jahre	153	

Tabelle 12: Bilanzen Wärmeschutz und CO<sub>2</sub> Vergleich Blockständerbauart und Passivhausbauart mineralisch mit Heizung Luft-Wasser-Wärmepumpe

## 7. Ergebnisse und Erkenntnisse

### 7.1 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck Außenwände

Von den drei untersuchten Bauarten verfügen die Außenwänden der 1-schaligen Konstruktion mit Dicke 240 mm und U-Wert 0,496 W/(m<sup>2</sup>K) erwartungsgemäß über den ungünstigsten Wärmedurchgang. Er liegt etwa um den Faktor 3 höher als die Außenwand in Blockständerkonstruktion (U = 0,168 W/(m<sup>2</sup>K)) und um das 3,6 fache höher als die fiktiv angenommene Vergleichswand in Passivhausstandard (U = 0,136 W/(m<sup>2</sup>K)). Unter der Annahme gleicher Heizungssysteme verhalten sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Nutzungsphase (Modul B1 nach EN 15804) proportional zum Wärmedurchgang. Die Treibhausgas-Emissionen in den Herstellungsprozessen, ausgedrückt durch den Kennwert GWP, ergeben bei den Gebäuden in Massivholzbauart Minus-Werte. Dies aufgrund der biogenen Kohlenstoffbindung in der Summe der Module A1-A3 nach EN 15804.

Bei vergleichenden Betrachtungen der Module Herstellung (A1-A3) und Nutzung (B1) mit unterschiedlichen Bauarten ist die gewählte Heizungsanlage zu beachten. Bei Systemen mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen kann die einschalige Außenwand trotz der höheren Transmissionswärmeverluste über sehr lange Zeiträume betrieben werden, ehe sich in der Gesamtsumme Herstellung und Nutzung (A1-A3 + B1) ein Ausgleich mit fiktiver mineralischer Passivhausbauart einstellt. Je höher die Treibhausgasemissionen der gewählten Anlagentechnik in der Nutzungsphase, umso kürzer wird der Zeitraum bis Ausgleich der Gesamtsumme Herstellung und Nutzung im Vergleich.

Die nachstehende Grafik zeigt diese Zusammenhänge für die einschalige Blockwand mit Dicke 240 mm mit Verwendung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Jahresarbeitszahl (JAZ) 2,5. Nach GEG Anlage 9 ist Strom, der aus dem Netz bezogen wird, mit 560 g CO<sub>2,eq</sub> / kWh anzusetzen. Bei JAZ 2,5 ergeben sich hieraus 560 / 2,5 = 224 g CO<sub>2,eq</sub> / kWh. Beispielsweise wird Erdgas nach GEG mit 240 g CO<sub>2,eq</sub> / kWh angesetzt und liegt somit in einem ähnlichen Bereich. Im Vergleich mit einer fiktiven mineralischen Außenwand im Passivhausstandard erfolgt ein Ausgleich nach einer Nutzungsdauer von 41 Jahren:

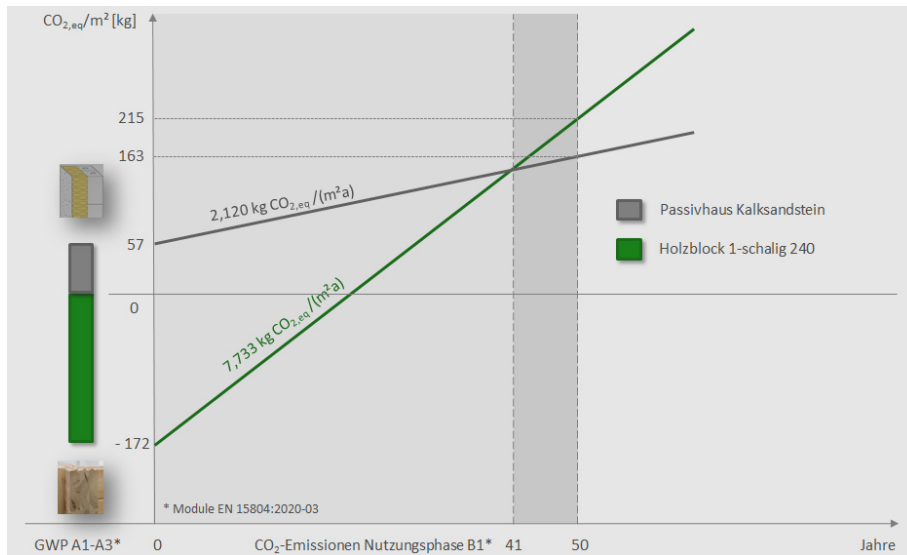


Abbildung 1: CO<sub>2</sub>-Salden Herstellungsprozesse (A1-A3) und Nutzungsphase (B1) Außenwand Blockbauart und Passivbauart, Gleichstand CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Nutzungsdauer 41 Jahre bei Verwendung Luft-Wasser-Wärmepumpe, vergleiche Punkt 6.2.

Über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren sind die Gesamtemissionen A1-A3 + B1 bei Blockbauart mit 216 kg CO<sub>2,eq</sub> um 32 % höher als bei mineralischer Passivhausbauart (163 kg CO<sub>2,eq</sub>).

Bei Beheizung mit Nah-/Fernwärme aus erneuerbaren Heizstoffen ist nach GEG ein CO<sub>2</sub>-Faktor von 60 g CO<sub>2,eq</sub> / kWh anzusetzen. Der Gleichstand der Salden Blockbauart und mineralischer Passivbauart wird dann nach 152 Jahren eintreten, was einen hypothetischen Wert darstellt:

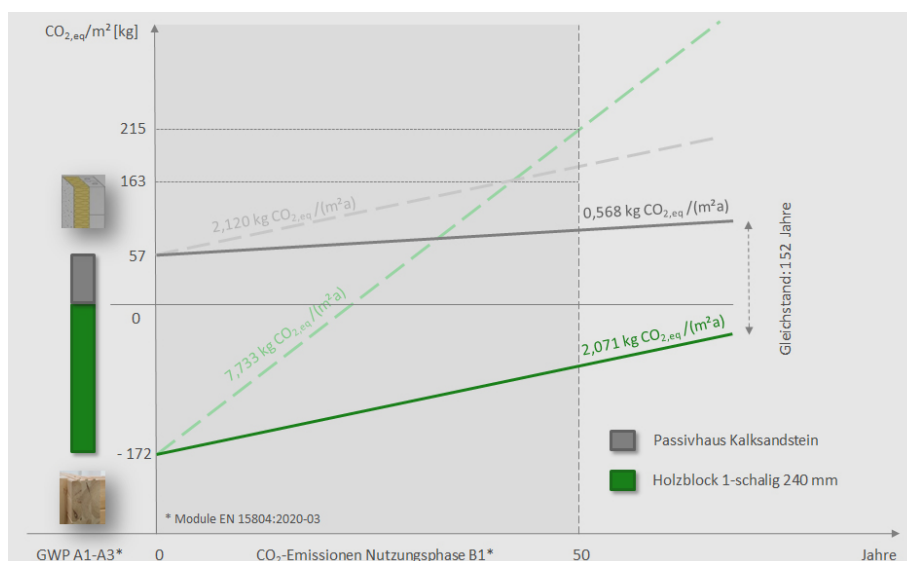


Abbildung 2: CO<sub>2</sub>-Salden Herstellungsprozesse (A1-A3) und Nutzungsphase (B1) Außenwand Blockbauart und Passivbauart, Gleichstand CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Nutzungsdauer 152 Jahre bei Wärmeversorgung durch Heizwerk, vergleiche Punkt 6.3

Blockaußenwände mit Innendämmung und in Blockständerbauweise verfügen durch die verbaute Holzmenge über ein hohes biogenes Kohlenstoffbindungspotenzial. Durch die Verwendung von zusätzlichen Dämmstoffen reduzieren sich die Unterschiede zur Außenwänden in mineralischer Passivbauart während der Nutzungsphase. Bei der untersuchten Bauart Blockaußenwände mit Innendämmung wäre ein Gleichstand mit Passivbauart, jeweils mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, nach einer Nutzungsdauer von 59 Jahren erreicht (Punkt 6.4), bei Blockständerbauart nach (theoretisch) 153 Jahren (Punkt 6.5).

Erkenntnisse:

1)

Die CO<sub>2</sub>-Salden aus Herstellung (Module A1-A3) und Nutzung (Modul B1) werden zu maßgeblichen Teilen nicht durch die Nutzungsphase, sondern durch das Treibhausgaspotenzial der verwendeten Baustoffe im Herstellungsprozess beeinflusst.

2)

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Nutzungsphase, verursacht durch die Art der Heizungsanlage, haben erheblich größeren Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Salden als die U-Werte der Außenwände, sofern sich diese innerhalb des Niedrigenergiestandards befinden.

## 7.2 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck Gebäude

Bei Gebäuden, deren Außenwände in Vollholzbauart errichtet werden, werden im Regelfall auch Innenwände, Zwischendecken und Dächer konstruktiv aus Holzbauteilen errichtet. Bei den Treibhausgasemissionen in den Herstellungsprozessen der Baustoffe (Module A1-A3) treten deshalb bei Betrachtung des gesamten Gebäudes sehr große Unterschiede zu mineralischen Bauarten auf.

Energieverluste durch Wärmebrücken oder Lüftung (sofern ohne zusätzliche Anlagentechnik) sind weitgehend unabhängig von der Bauart.

Gleiches gilt für solare Gewinne durch Glasflächen sowie für interne Wärmegewinne (Beleuchtung, Haushaltgeräte usw.). Die Unterschiede zwischen den Bauarten während der Nutzungsphase sind deshalb vergleichsweise gering.

Beim Blockhaus mit einschaligen Außenwänden wurde bei ausschließlicher Betrachtung der Außenwände ein Gleichstand zwischen Holzbau und Mineralbau im Passivstandard bei Verwendung Luft-Wasser-Wärmepumpe nach 41 Jahren erreicht.

Für das Gebäude gesamt hingegen würde ein solcher Gleichstand unter Verwendung der Zahlen Punkt 6.2 hypothetisch erst nach etwa 296 Jahren eintreten, siehe die nachstehende Grafik:

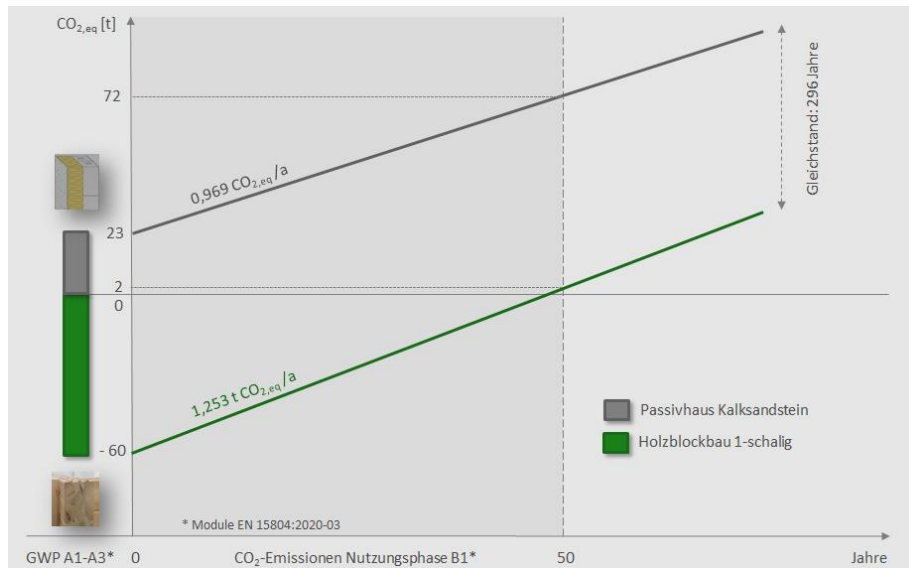


Abbildung 3: CO<sub>2</sub>-Salden Herstellungsprozesse (A1-A3) und Nutzungsphase (B1) Gesamtgebäude Blockbauart und Passivbauart, Gleichstand CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Nutzungsdauer 296 Jahre bei Wärmepumpe, vergleiche Punkt 6.2

Bei den Bauarten Blockwände mit Innendämmung (247 Jahre) und Blockständerbauart (584 Jahre) ergeben sich ebenso hypothetische Werte bis zum Gleichstand der CO<sub>2</sub>-Salden Holzbauart und mineralischer Passivbauart auch bei Verwendung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe.

Erkenntnisse:

1)

Bei Gebäuden in Massivholzbauart werden nicht nur die thermisch beanspruchten Außenwände unter maßgeblicher Verwendung von Holz errichtet. Auch Innenbauteile wie Innenwände und Zwischendecken, ebenso die Dachkonstruktion bestehen hier zu maßgeblichen Teilen aus Holz. Dies beeinflusst den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck signifikant.

2)

Die Unterschiede beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im Vergleich zwischen Massivholz- und Mineralbauart (auch im Passivstandard) sind auf Gebäudeebene besonders ausgeprägt.

3)

Ein Gleichstand der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Herstellung und Nutzung (A1-A3 + B1) im Vergleich Massivholzbauart und Mineralbau im Passivstandard kann innerhalb einer typischen Lebensdauer von 80-100 Jahren nicht erreicht werden. Dies gilt auch für den „ungünstigsten“ Betrachtungsfall 1-schalige Blockaußenwände und Heizungsanlage mit vergleichsweise hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen (hier Luft-Wasser-Wärmepumpe).

## 8. Vorschlag Anrechnung Kohlenstoffsequestrierung

### 8.1 Aspekt Umweltproduktdeklarationen

Umweltproduktdeklarationen (EPDs) sind geeignet für Vergleiche der klimaschutztechnischen Auswirkungen von unterschiedlichen Bauarten. Für die Erstellung solcher Deklarationen müssen zahlreiche Randbedingungen wie z.B. Transportwege, anteiliger Einsatz erneuerbarer Energien bei Herstellungsprozessen, Materialverluste und anderes mehr definiert werden. Dies erschwert die Vergleichbarkeit von EPDs insbesondere dann, wenn sie aus unterschiedlichen Quellen stammen. Auch unterliegen die Regelwerke zur Berechnung solcher Deklarationen aktuell sehr dynamischen Veränderungen, sodass unterschiedliche Datenstände möglich sind. Nicht zuletzt sind in EPDs nach EN 15804 nur die Module A1-A3 „von der Wiege bis zum Werktor“ verpflichtend. Alle weiteren Module können, müssen jedoch nicht beschrieben werden. Auch dies erschwert die Vergleichbarkeit von EPDs über den Lebenszyklus eines Gebäudes hinweg.

### 8.2 Aspekt Kohlenstoffbindung

Im Gegensatz zum Kennwert GWP aus EPDs folgt die biogene Kohlenstoffsequestrierung beim Wachstum von Holz und allgemein von nachwachsenden Rohstoffen unveränderlichen physikalischen Grundgesetzen. Die entsprechenden Berechnungsgrundlagen für Holz sind in der EN 16449 beschrieben, siehe hierzu auch Punkt 6.1 des vorliegenden Berichts. Beim Beispiel Nadelholz mit Rohdichte  $460 \text{ kg/m}^3$  bei einem Holzfeuchtegehalt von 12 Masseprozent werden je Kubikmeter darrtrockene Biomasse der Umwelt  $753 \text{ kg CO}_2$  entzogen. Da es sich hierbei um konstant bleibende physikalische Zusammenhänge handelt, basiert der nachstehende Vorschlag auf einer Anrechnung der Kohlenstoffbindung nicht auf EPDs, sondern auf biogener Kohlenstoffsequestrierung nach EN 16449. Massivholzhäuser werden häufig mit Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ausgestattet. Hier können Holzarten und somit Darrrohlichten auftreten, die von den konstruktiven Holzbauteilen abweichen. Der hier dargelegte Berechnungsvorschlag basiert auf einer durchschnittlichen Rohdichte von  $460 \text{ kg/m}^3$  bei 12 % Feuchtegehalt und ist als zutreffend auch für Holzfaserverprodukte, die aus Nadelholz hergestellt werden, zu betrachten.

### 8.3 Aspekte Kaskadennutzung

Nach einem aktuellen Entwurf zur Modifizierung der europäischen Gebäuderichtlinie [11], ebenso in nationalen Entwürfen wird bei der Auswahl von Baustoffen und Herstellung von Bauteilen verstärkt Recyclingfähigkeit und stoffliche Wiederverwendbarkeit gefordert. Die Notwendigkeit und erste Ansätze zur Umsetzung von Kaskadenstrategien sind etwa in [12] und [13] beschrieben. Blockhauskonstruktionen, wie sie im vorliegenden Projekt erfasst wurden, werden überwiegend aus einzelnen Holzstäben gefertigt, die durch mechanische Verbindungsmittel zueinander fixiert sind. Diese Holzbauteile lassen sich am Ende der Nutzungsphase mit geringem Aufwand unmittelbar vor Ort stofflich wieder trennen. Bei Wänden, Decken und Dächern werden Holzquerschnitte und Profile eingesetzt, die auch für eine baulich-konstruktive Wiederverwertung geeignet sind.

Die nachstehende Abbildung veranschaulicht eine mögliche stoffliche Kaskadennutzung von Holzbauteilen, wie sie mit Blockbauarten besonders effektiv gestaltet werden können:

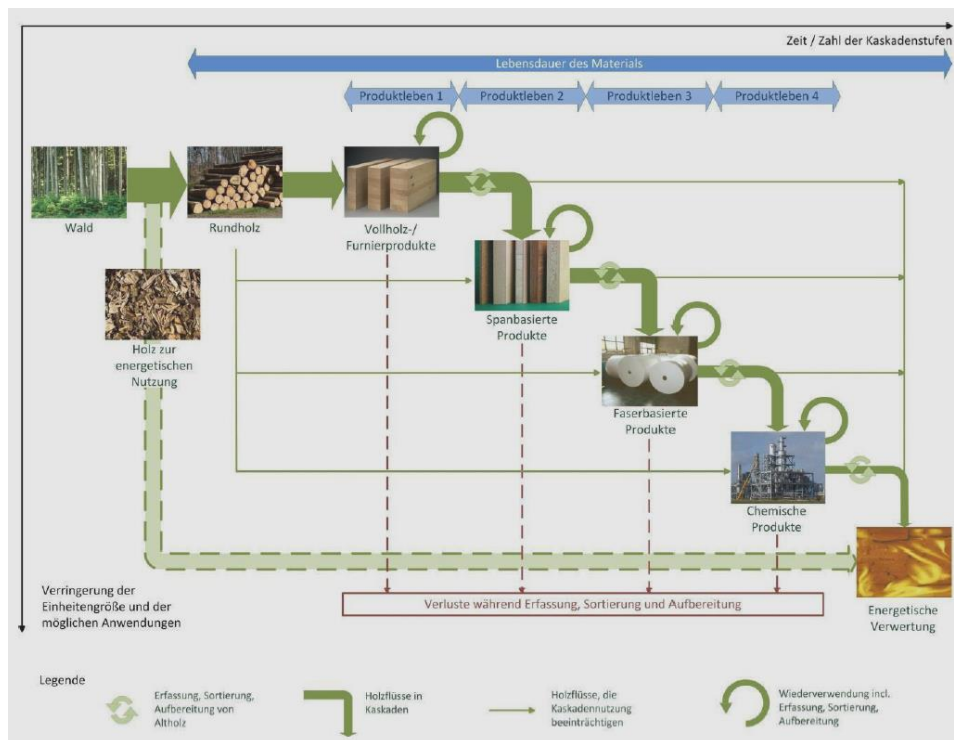


Abbildung 4: Kaskadennutzung von Holzbauteilen, beginnend von stofflicher Wiederverwendung über Zerspanung und Zerfasern bis hin zu thermischer Verwertung (Bildquelle TUM / Höglmeier et al.)

Zur Unterstützung des Kaskadenprinzips ist es erforderlich, die Eignung von Baustoffen und Bauteilen hierfür bereits zum Zeitpunkt der Neuerrichtung zu bewerten und Kriterien hierzu zu erarbeiten. Im vorliegenden Projekt wird ein sogenannter „Kaskadenfaktor“  $f_{cas}$  vorgeschlagen, der als Orientierungsrahmen für eine spätere stoffliche Wiederverwertung dienen kann. Die Einstufung könnte auf Basis von Bauteilen, hier konkret für Außenwände, wie folgt sein:

$f_{cas} = 0,20$  Geringe Wahrscheinlichkeit einer späteren stofflichen Wiederverwendung

$f_{cas} = 0,50$  Eine stoffliche Wiederverwendung erscheint möglich

$f_{cas} = 0,80$  Aufgrund von Konstruktion und Baustoffen sind die Bedingungen für eine stoffliche Wiederverwendung sehr gut

Wenn mit stofflicher Wiederverwendung eine wirksame Reduzierung des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen erreicht werden soll, müssen nicht zuletzt vom Gesetzgeber geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden. Exemplarisch in der für Deutschland gültigen Altholzverordnung [14] ist eine stoffliche Wiederverwendung von Holzbauteilen allenfalls in Form von Zerspanung, nicht jedoch in Form von konstruktiven Holzbauteilen (Bretter, Bohlen, Kanthölzer etc.) vorgesehen. Auch in Umweltproduktdeklarationen von konstruktiven Holzbauteilen, beispielsweise in [15] oder [16], ist der Gedanke Kaskadennutzung nicht berücksichtigt. Es wird im Wesentlichen von thermischer Verwertung ausgegangen.

#### 8.4 Aspekte Suffizienz

Suffizienz im Sinne des Umwelt- und Klimaschutzes bedeutet das Bemühen um eine Verringerung von Ressourcen- und Energieverbrauch. Die im Baugeschehen gegenwärtig festzustellende „U-Wert-Rally“ steht in klarem Widerspruch zu Suffizienz. Mit immer dickeren Dämmpaketen versehene Bauteile benötigen im Herstellungsprozess immer mehr Ressourcen. Umgekehrt müssen bei Gebäuden

im Niedrigenergiestandard Jahrzehnte durchschritten werden, bis dieses Mehraufwand an Rohstoffen und Energie letztendlich durch einen etwas reduzierten Verbrauch in der Nutzungsphase ausgeglichen werden kann. Das hier vorgestellte Berechnungsmodell ist ein Vorschlag für einen ausgewogenen Ausgleich zwischen Herstellungsprozessen und Nutzungsphase. Bei der Verwendung von umweltschonenden nachwachsenden Rohstoffen können unter Beachtung von Suffizienz die Dämmstoffdicken in einem gewissen Maß reduziert werden. In der Gesamtschau Herstellung + Nutzung werden dabei deutlich weniger Treibhausgase emittiert als dies in den Regelnachweisen (nur Nutzungsphase, keine Berücksichtigung CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Baustoffe) der Fall wäre.

## 8.5 Vorgaben Berechnungsmodell

Das nachstehende Berechnungsmodell basiert auf folgenden grundlegenden Anforderungen und Vorgaben:

a)

Die Anforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle können in einem begrenzten Rahmen reduziert werden, wenn in den Außenwänden Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen eingesetzt werden und in der Gesamtschau aus Herstellung + Nutzung über 50 Jahre kein schlechteres Ergebnis als im Regelverfahren eintritt.

b)

Die Möglichkeit einer stofflichen Wiederverwertung im Sinne einer Kaskadennutzung ist angemessen zu berücksichtigen.

c)

Der Niedrigenergiestandard des Gebäudes muss bei Anwendung des Berechnungsmodells erhalten bleiben. Alle Vorgaben zum Feuchteschutz und zum Mindestwärmeschutz sind einzuhalten.

d)

Die Verwendung von Holzbauteilen aus nachhaltiger Forstwirtschaft ist sicherzustellen.

e)

Das Berechnungsmodell enthält Sicherheitsreserven. So werden nur die Außenwände bewertet, obwohl auch thermisch nicht beanspruchte Innenbauteile bei solchen Bauarten maßgebliches CO<sub>2</sub>-Bindungspotenzial aufweisen. Auch werden Substitutionseffekte, mit denen anderweitige, in Herstellungsprozess energieintensivere Baustoffe durch nachwachsende Rohstoffe ersetzt werden, nicht berücksichtigt.

## 8.6 Berechnungsmodell

Die nachstehenden Berechnungsformeln basieren auf einem Vorschlag [17] und einer Erweiterung [18]:

$$U_{\text{mod,CO}_2} = U_{\text{limit}} + \Delta U_{\text{CO}_2}$$

$U_{\text{mod,CO}_2}$ : Modifizierter U-Wert infolge Verwendung nachwachsende Rohstoffe [W/(m<sup>2</sup>K)]

$U_{\text{limit}}$ : Bauteil- oder hüllenbezogener U-Wert als Höchstgrenze für Neubau [W/(m<sup>2</sup>K)]

$\Delta U_{\text{CO}_2}$ : Zulässige Erhöhung U-Werte Verwendung nachwachsende Rohstoffe [W/(m<sup>2</sup>K)]

$$\Delta U_{\text{CO}_2} = C_{\text{biogen}} / (U * \text{GTZ} * f_{\text{CO}_2}) / 50 \text{ a} * f_{\text{cas}} * f_{\text{EW}}$$

$C_{\text{biogen}}$ : biogene Kohlenstoffbindung [kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>]

$U_{\text{EW}}$ : rechnerischer U-Wert Außenwand [W/(m<sup>2</sup>K)]

GTZ: Gradtagszahlfaktor [kKh/a]

$f_{\text{CO}_2}$ : CO<sub>2</sub>-Faktor Heizungsanlage [kg CO<sub>2</sub>/kWh<sub>thermisch</sub>]

$f_{\text{CAS}}$ : Kaskadenfaktor [-]

$f_{\text{EW}}$ : Flächenanteil Außenwände an  $U_{\text{limit}}$  [%/100]

Nachstehend einige Erläuterungen zu diesen Kennwerten:

Kennwert	Erläuterung
biogene Kohlenstoffbindung $C_{\text{biogen}}$	Ermittlung nach EN 16449 anhand Rohdichte und Holzfeuchtegehalt
$U_{\text{EW}}$	rechnerischer U-Wert der Außenwand (exterior wall), Berechnung nach EN ISO 6946 []
GTZ	Die Gradtagszahl wird nach VDI 2067 errechnet und ist ein standortbezogener Kennwert hier zur Umrechnung der Transmissionswärmeverluste je m <sup>2</sup> Außenwand in den Heizenergiebedarf in kWh/Jahr [kKh/a]
$f_{\text{CO}_2}$	CO <sub>2</sub> -Faktor Heizung je kWh Energieverbrauch [kg CO <sub>2</sub> /kWh <sub>thermisch</sub> ]
$f_{\text{CAS}}$	Kaskadenfaktor, neue Rechengröße, Erläuterungen siehe Punkt 8.3 [-]
$f_{\text{EW}}$	Prozentualer Flächenanteil Außenwände an der zu betrachtenden Gebäudefläche (1,0 bei Bauteilverfahren Außenwände, z.B. 0,42 beim Hüllenverfahren mit 42 % Anteil der Außenwände an der gesamten zu betrachtenden Fläche)

## 8.7 Berechnungsbeispiel Hüllenverfahren

Hüllenverfahren bedeutet, dass nicht der Wärmewiderstand einzelne Bauteile, sondern die thermisch beanspruchte Hüllfläche als Gesamtes betrachtet wird und hierfür ein durchschnittlicher Höchst-U-Wert vorgegeben ist. Dieses Berechnungsverfahren findet beispielsweise in Deutschland im aktuell gültigen Gebäudeenergiegesetz GEG Anwendung. Der durchschnittliche zulässige Höchstwert wird dabei als  $H_T$  [W/(m<sup>2</sup>K)] bezeichnet.



Vorgaben:

Gesamte thermische Hüllfläche:	499 m <sup>2</sup>
Fläche Außenwände 182,9 m <sup>2</sup> :	182,9 m <sup>2</sup> (=> 37 % => f <sub>EW</sub> = 0,37)
Ø U-Wert Gebäudehülle soll:	U <sub>limit</sub> ≤ 0,352 W/(m <sup>2</sup> K)
Ø U-Wert Gebäudehülle Ist:	H' <sub>T</sub> = 0,385 W/(m <sup>2</sup> K)
Heizungsart:	Luft-Wasser-Wärmepumpe, f <sub>CO<sub>2</sub></sub> = 0,224 kg CO <sub>2</sub> /kWh
biogene Kohlenstoffbindung AW:	C <sub>biogen</sub> = 166 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> (1-schalige Außenwand 240 mm)
U-Wert Außenwand:	0,496 W/(m <sup>2</sup> K)
GTZ:	69,6 kWh/a
Nutzungszeitraum:	50 Jahre
Kaskadenfaktor f <sub>CAS</sub> :	0,50

Berechnung:

$$\Delta U_{CO_2} = C_{biogen} / (U * GTZ * f_{CO_2}) / 50 a * f_{cas} * f_{EW}$$

$$\Delta U_{CO_2} = 166 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 / (0,496 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) * 69,6 \text{ kWh/a} * 0,224 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}) / 50 \text{ a} * 0,50 * 0,37$$

$$\Delta U_{CO_2} = 0,079 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$U_{mod,CO_2} = U_{limit} + \Delta U_{CO_2}$$

$$U_{mod,CO_2} = 0,352 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) + 0,079 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) = 0,431 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$H'_T (0,385 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})) < U_{mod,CO_2} (0,431 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})) \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

## 8.8 Berechnungsbeispiel Bauteilverfahren

Für Außenwände existiert ein höchstzulässiger U-Wert. Exemplarisch für Österreich darf ein Wert von 0,35 W/(m<sup>2</sup>K) nicht überschritten werden.

Vorgaben:

Höchst-U-Wert Außenwand:	U <sub>limit</sub> ≤ 0,352 W/(m <sup>2</sup> K)
Heizungsart:	Luft-Wasser-Wärmepumpe, f <sub>CO<sub>2</sub></sub> = 0,224 kg CO <sub>2</sub> /kWh
biogene Kohlenstoffbindung AW:	C <sub>biogen</sub> = 166 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> (1-schalige Außenwand 240 mm)
U-Wert Außenwand:	0,496 W/(m <sup>2</sup> K)
GTZ:	76 kWh/a (Bundesland Salzburg in Österreich)
Nutzungszeitraum:	50 Jahre
Kaskadenfaktor f <sub>CAS</sub> :	0,50

Berechnung:

$$\Delta U_{CO_2} = C_{biogen} / (U * GTZ * f_{CO_2}) / 50 a * f_{cas} * f_{EW}$$

$$\Delta U_{CO_2} = 166 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2 / (0,496 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) * 76 \text{ kWh/a} * 0,224 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}) / 50 \text{ a} * 0,50 * 1,00$$

$$\Delta U_{CO_2} = 0,197 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$U_{mod,CO_2} = U_{limit} + \Delta U_{CO_2}$$

$$U_{mod,CO_2} = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) + 0,197 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) = 0,547 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$U_{EW} (0,496 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})) < U_{mod,CO_2} (0,547 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})) \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

## Literaturangaben

- [1] Sechster IPCC-Sachstandsbericht (AR6), Beitrag von Arbeitsgruppe II: Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit, 2022-02-28
- [2] Richtlinie (EU) 1020/31/EU, Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, (Energy performance of buildings directive), 2010-07-09
- [3] DIN EN 15804:2020-03 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013
- [4] DIN EN 16449:2014-08 Holz und Holzprodukte - Berechnung des biogenen Kohlenstoffgehalts im Holz und Umrechnung in Kohlenstoffdioxid; Deutsche Fassung EN 16449:2014
- [5] DIN EN ISO 6946:2018-03 Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2017
- [6] www.oekobaudat.de - vereinheitlichte Datenbasis für die Ökobilanzierung von Bauwerken; Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), Datenstand 2021-10
- [7] www.baubook.info - Datenbank für ökologisches Bauen und Sanieren; Baubook GmbH, Datenstand 2021-10
- [8] ZUB Helena Ultra Version 7.111, Software für Wärmeschutznachweise nach EnEV und GEG, ZUB Kassel
- [9] Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz GEG), Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728)
- [10] DIN EN ISO 10211:2018-03 Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2017); Deutsche Fassung EN ISO 10211:2017
- [11] Proposal Energy performance of buildings directive, EU Commission, 2021-12-15
- [12] Fehrenbach H., Köppen S. et al., Biomassekaskaden - Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse - von der Theorie zur Praxis, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 3 713 44 100, 2017-02
- [13] Höglmeier K., Weber-Blasche G., Richter K., Kaskadennutzung von Altholz in Bayern, Mengenzugänge aus dem Gebäudebestand und ökologische Bewertung, LWF aktuell 2/2016
- [14] Altholzverordnung vom 15. August 2002 (BGBl. I S. 3302), die zuletzt durch Artikel 120 der Verordnung vom 19. Juli 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- [15] Umweltproduktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 für Brettschichtholz (BS-Holz), EPD-SHL-20180027-IBG1-DE, Deklarationsinhaber Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.
- [16] EPD of Finnish sawn and planed timber - Finnish Sawmills Association, RTS\_124\_21, Issue date 2021-06-10
- [17] Hauser G., Lüking R.-M., Klimaentlastung durch Massivholzbauarten (Teil 1 u. 2), Bauphysik 34 (2012), Heft 5, Seite 204-209, Heft 6, Seite 292 - 301
- [18] Egle J., Lüking R.-M., Erarbeitung und Vorschlag eines Verfahrens zur Anerkennung der CO<sub>2</sub>-Senkenleistung von Holzbauteilen in öffentlich-rechtlichen Nachweisen zum Wärmeschutz unter Berücksichtigung der tatsächlichen Klimaschutztechnischen Eigenschaften von Bestandsgebäuden, Deutscher Massivholz- und Blockhausverband, Abschlussbericht 2019-05-08