

Reduzierung des CO₂-Bedarfs von Hochbauwerken in Schleswig-Holstein

Institutsbericht Nr. KI – 25 / 01
des Instituts für Bauwesen
der Fachhochschule Kiel

Erstellt von: Institut für Bauwesen der Fachhochschule Kiel
Professor Dr.-Ing. Stephan Görtz
Thi Kim Dung Pham, M. Sc.

Vergleichsrechnung zur CO₂-Emission aus Gebäudebetrieb
Professor Dr.-Ing. Frauke Gerder-Rohkamm

Mit Unterstützung: Gebäudemanagement Schleswig-Holstein AöR
Küterstraße 30, 24103 Kiel
Dipl.-Ing. Kerstin Hagelgans

bbp : architekten bda
Dänische Straße 44, 24103 Kiel
Dipl.-Ing. Sven Friedrichs / Dipl.-Ing. Aaron Opfermann

Ingenieurteam TREBES
Preußerstraße 1-9, 24105 Kiel
Dr.-Ing. Simon Kern

Gefördert durch: EKSH
(Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH)



Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns sehr herzlich bei der ARGE//eV Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., dem Ingenieurbüro für Bauwesen Horn + Horn (Neumünster) sowie der Bonava Deutschland GmbH bedanken, die uns für verschiedene Bauwerke Unterlagen zur Durchführung von CO₂-Bilanzierungen in anonymisierter Form zur Verfügung gestellt hat.

Darüber gilt unser besonderer Dank der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH für die Förderung des Projektes.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Ausgangssituation und Zielsetzung | 4 |
| 1.1 | Ausgangssituation | 4 |
| 1.2 | Zielsetzung | 5 |
| 2. | Vorgehensweise bei der Bearbeitung | 7 |
| 3. | Grundlagen der CO ₂ -Berechnungen zur „grauen Emission“ | 8 |
| 3.1 | Allgemeine Grundlagen der CO ₂ -Bilanzierung von Bauwerken | 8 |
| 3.2 | Konkretisierung bei Hochbauwerken | 9 |
| 3.2.1 | Allgemeines | 9 |
| 3.2.2 | Ermittlung der CO ₂ -Anteile aus dem Bauwerk / „graue Emission“ | 10 |
| 4 | Ermittlung der „grauen Emission“ aktueller Hochbauwerke | 22 |
| 4.1 | Auswahl der Gebäude | 22 |
| 4.2 | Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen an Massivbauwerken | 22 |
| 4.2.1 | Vorgehen bei der Auswertung der Ergebnisse | 22 |
| 4.2.2 | Spannweite der CO ₂ -Emissionen | 23 |
| 4.2.3 | Aufteilung der CO ₂ -Emissionen auf die einzelnen Phasen A-D in Abhängigkeit der Nutzungsdauer | 24 |
| 4.2.4 | Einfluss der Nutzungsdauer | 26 |
| 4.2.5 | Aufteilung der CO ₂ -Emission auf verschiedene Gebäudegruppen und Bauteile der Baukonstruktion (KG 300) | 27 |
| 4.2.6 | Aufteilung der CO ₂ -Emission auf verschiedene Komponenten bzw. Baustoffe | 34 |
| 4.3 | Zusammenfassung der CO ₂ -Untersuchungen an aktuellen Neubauten | 35 |
| 5 | Untersuchungen von Optimierungen zur Reduzierung der grauen Emission | 39 |
| 5.1 | Allgemeines | 39 |
| 5.2 | Untersuchung des Einflusses der „Energiewende“ auf die ermittelten CO ₂ -Emissionen | 40 |
| 5.3 | Untersuchung zur Verlängerung der Lebensdauer der Gebäude | 43 |
| 5.4 | Untersuchung des Einsatzes von Holzbauteilen in der Baukonstruktion | 44 |
| 5.4.1 | Vorgehensweise | 44 |
| 5.4.2 | Ergebnisse der Untersuchung | 44 |
| 5.5 | Untersuchung hinsichtlich Deckensysteme | 47 |
| 5.5.1 | Auswahl der Deckensysteme und Randbedingungen | 47 |
| 5.5.2 | Ergebnisse der Bemessung und CO ₂ -Berechnung | 49 |
| 5.6 | Untersuchung hinsichtlich Außenwandsystemen | 55 |
| 5.6.1 | Auswahl der Wandsysteme und Randbedingungen | 55 |
| 5.6.2 | Ergebnisse der Bemessung und CO ₂ -Berechnung | 57 |
| 5.7 | Untersuchung hinsichtlich verschiedenen Estricharten | 64 |
| 5.7.1 | Auswahl der Systeme und Dimensionierung | 64 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5.7.2 | Ergebnisse der Untersuchung | 66 |
| 5.8 | Untersuchungen zu Bodenbelägen | 68 |
| 5.9 | Untersuchungen zu Dämmstoffen für die Außendämmung | 70 |
| 5.10 | Zusammenfassung der CO ₂ -Optimierungsvorschläge und Abschätzung der möglichen Reduzierung | 72 |
| 6 | Vergleich der Grauen Emission mit dem CO ₂ aus dem Gebäudebetrieb | 78 |
| 6.1 | Grundlagen | 78 |
| 6.2 | Berechnungen..... | 81 |
| 6.2.1 | Ergebnisse MFH Woh4 | 82 |
| 6.2.2. | Ergebnisse MFH Woh5 | 89 |
| 6.2.3 | Ergebnisse Bürogebäude Bue4..... | 93 |
| 6.3 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 96 |
| 7 | Zusammenfassung..... | 98 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 101 |

1. Ausgangssituation und Zielsetzung

1.1 Ausgangssituation

Durch Bauprozesse werden ein Großteil der zur Verfügung stehenden Ressourcen verbraucht und immense Mengen an CO₂ ausgestoßen. In Deutschland entfallen fast 40 % des gesamten Energiebedarfs und ca. 1/3 der CO₂-Emissionen auf die Herstellung und Nutzung von Gebäuden, aktuelle Recherchen von Weidner et al. (2021) [1] und Sobek (2022) [2] u. a. gehen sogar eher von 50 % aus.

Die Zahlen sind umso dramatischer, wenn man bedenkt, dass im Hochbau ein riesiger Bedarf an Wohnraum besteht. Auch bzw. weil die bundesweiten Zielvorgaben von 400.000 neuen Wohneinheiten pro Jahr in den letzten Jahren wegen der COVID-Pandemie und der Auswirkungen des Ukraine-Kriegs deutlich verfehlt worden (Fertigstellung 2023: ca. 271.000 Wohneinheiten, 2024: ca. 235.000 Wohneinheiten), besteht aktuell ein riesiger Fehlbedarf von ca. 800.000 Wohneinheiten [3]. Gleiches gilt auch für Schleswig-Holstein. Im Jahre 2018 wurden gemäß Bericht der Landesregierung vom 13.06.2018 ca. 150.000 neue Wohneinheiten benötigt, die Zielvorgabe von 14.000 Wohneinheiten pro Jahr wurden ebenfalls in den letzten Jahren nicht erreicht, so dass auch hier von einem gestiegenen Fehlbedarf auszugehen ist.

Genauso besteht ein riesiger Bedarf im Bereich öffentlicher Hochbauwerke. In Schleswig-Holstein übernimmt hierbei die GMSH (Gebäudemanagement Schleswig-Holstein AöR) die Bauherren- und Planungsaufgaben für das Land und den Bund, das umfasst ca. 8 Mio. m³ umbauten Raum für das Land und ca. 6 Mio. m³ umbauten Raum für den Bund. Vor dem Hintergrund einer Lebensdauer von ca. 60 – 100 Jahren (i. M. 80 Jahre) bedeutet dieses ein jährliches Bauvolumen (Instandhaltung, Sanierung und Neubau) von ca. 175.000 m³ pro Jahr. Alleine an Unterkunftsgebäuden im Bereich Bundeswehr sind bis 2030 insgesamt 13 Neubauten mit einem Volumen von 140.000 m³ umbauten Raum projektiert.

Basierend auf dem in Deutschland zur Verfügung stehenden CO₂-Restbudget und dem zukünftig vorgesehenen Bauvolumen ist in [1] errechnet worden, dass für Bauprojekte je Kubikmeter umbauten Raum lediglich ca. 32 kgCO₂ verbraucht werden dürften. Nach in der Literatur dokumentierten Vergleichsrechnungen [4], ist jedoch davon auszugehen, dass der Verbrauch bei der Gebäudeerstellung in konventioneller Bauweise aktuell bei ca. 140 kgCO₂/m³ liegt, also mehr als das Vierfache der zulässigen Werte. Hiervon besteht auch ein nennenswerter Anteil aus energieunabhängigen prozessbedingten CO₂-Emissionen, der auch bei einer Erhöhung des regenerativen Anteils bei der Energieerzeugung nicht eliminiert wird. Daher ist zwingend eine drastische Reduzierung des CO₂-Anteils gefordert, der für die Errichtung der Bauwerke verbraucht wird, die sogenannte „graue Emission“.

Bisherige Einsparungen haben sich nahezu ausschließlich auf den Energieverbrauch während des Gebäudebetriebes konzentriert. Basierend auf dem Energieeinspargesetz im Jahre 1976 wurden 1998 zunächst die Wärmeschutzverordnung und ab 2002 die Energieeinsparverordnung (EnEV) eingeführt, die regelmäßig (2004, 2007, 2009, 2014, 2016) aktualisiert und verschärft wurde, und 2020 durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG) abgelöst wurde. Diese Regelungen zielen jedoch ausschließlich auf den Betrieb von Gebäuden. Hierdurch sind die energetischen Standards in Bezug auf die Gebäudehülle inzwischen so hoch, dass aus dem Gebäudebetrieb zukünftig keine weitere CO₂-Einsparung mehr zu erwarten ist.

Auch die Vorgaben der „Teilstrategie 2019/2020 Bauen und Bewirtschaftung von Landesliegenschaften“ in Schleswig-Holstein, die die Maßnahmen zum Erreichen der Klimaschutzziele

der Landesverwaltung, die nach dem Energiewende- und Klimaschutzgesetz Schleswig-Holstein – (EWKG) gesetzlich eingefordert sind, zusammenfasst, beschränken sich nahezu ausschließlich auf Energieeinsparungen im Betrieb von Gebäuden, wengleich erwähnt wird, dass bei Umsetzung der treibhausgasneutralen Strom- und Wärmeversorgung die „grauen Emissionen“ bis 2050 die einzigen noch verbleibenden Emissionen sind und daher hier ein besonderer Fokus zu setzen ist. Konkrete Vorgaben zur Begrenzung der „grauen Emissionen“ fehlen allerdings bislang weitestgehend.

Dadurch, dass für praktische Planungsprozesse sowohl Vorgaben als auch Planungshilfen bzw. Orientierungswerte fehlen, spielt die Reduzierung der grauen Emission in der Planung und Ausführung im Bauwesen zurzeit nahezu keine signifikante Rolle. Auch in Bewertungsverfahren zur Nachhaltigkeit, dieses sind in Deutschland im Regelfall das BNB-Zertifizierungsverfahren (BNB = Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen) für Bundesbauten und das DGNB-Verfahren (DGNB = Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen) für privatwirtschaftliche oder auch kommunale Gebäude, ist der gesamte Komplex der Ökologie nur ein Gesichtspunkt neben anderen Bereichen wie ökonomische und soziokulturelle Nachhaltigkeit und der konkrete Anteil der „grauen Emission“ (also der CO₂-Anteil aus der Gebäudeerstellung) als ein Parameter der ökologischen Qualität, hat nur einen marginalen Einfluss von 3,375% auf die Gebäudebewertung.

1.2 Zielsetzung

Vor dem o. g. Hintergrund sollten im Rahmen des hier dokumentierten Forschungsvorhaben folgende Punkte bearbeitet werden:

1. Durchführung von umfassenden CO₂-Bilanzen an landestypischen Hochbauwerken, um einen Überblick bzw. Transparenz über die CO₂-Emission / der „grauen Emission“ typischer Hochbaukonstruktionen zu schaffen.
2. Herausarbeiten, was die wesentlichen CO₂-Treiber typischer Hochbauwerke sind.
3. Vergleich der CO₂-Treiber der Hochbauwerke mit der CO₂-Emission aus dem Betrieb des Bauwerks. Hierbei ist zwischen aktuellen und zukünftigen Regelungen zu unterscheiden.
4. Herausarbeiten konkreter Maßnahmen, wie der CO₂-Bedarf eines Hochbauwerks möglichst kostenneutral im Mittel um etwa 30 % reduziert werden kann.

Hierdurch sollen vor allem Planern und Bauherrn / Betreibern konkrete Ansätze zur Verfügung gestellt werden, die CO₂-Bilanz zu optimieren.

Die in den Abschnitten 1 – 5 dargestellten Berechnungen wurden an der Fachhochschule Kiel im Bereich Massivbau von Herrn Prof. Dr. Görtz bzw. Frau Pham, M. Sc. durchgeführt bzw. dokumentiert. Die im Abschnitt 6 dargestellten Vergleichsrechnungen, welche CO₂-Emission aus dem Gebäudebetrieb zu erwarten ist, erfolgten von Frau Prof. Dr. Gerder-Rohkamm, Professorin für Green Building und Bauphysik an der Fachhochschule Kiel.

Die Zuarbeit hinsichtlich Bauwerksunterlagen sowie einer fachlichen Diskussion der Vorgehensweise und der Ergebnisse erfolgte durch bzw. mit den Praxispartner, der Gebäudemanagement Schleswig-Holstein AöR (GMSH) / Dipl.-Ing. Hagelgans, den bbp : architekten bda / Dipl.-Ing. Friedrichs bzw. Dipl.-Ing. Opfermann sowie dem Ingenieurteam TREBES / Dr.-Ing. Simon Kern.

Schlüsselwörter

- CO₂-Bilanzierung
- Hochbauwerke
- Beton
- Mauerwerk
- Holz
- Estrich
- Bodenbelag
- Ausbauten

2. Vorgehensweise bei der Bearbeitung

Die Bearbeitung erfolgt wie im genehmigten Forschungsantrag beschrieben in den folgenden fünf wesentlichen Arbeitsschritten:

Schritt 1: Festlegung der Gebäudetypen

In einem ersten Arbeitsschritt wurden mit Hilfe der Praxispartner verschiedene typische Gebäude zusammengestellt und in die drei Kategorien

- Büro- und Verwaltungsgebäude,
- Unterkunftsgebäude und
- Wohngebäude

unterteilt. Die ausgewählten Gebäude variieren in ihrer Vielfalt, einschließlich unterschiedlicher Bauweisen, Größen bzw. Existenz von Untergeschossen. Dies ermöglicht eine umfassende Abschätzung der CO₂-Emissionen von gängigen Hochbauten in Schleswig-Holstein.

Die ausgewählten Gebäude sind in Abschnitt 4.1 zusammenfassend bzw. anonymisiert dargestellt.

Schritt 2: Ermittlung der „grauen Emission“

Im folgenden Schritt wird die „graue Emission“ / die CO₂-Emission aus der Baukonstruktion und den technischen Anlagen ermittelt. Die CO₂-Bilanzierung erfolgt hierbei gemäß der Bewertungsmethodik der DIN EN 15978-1 [5] in Verbindung mit den Bilanzierungsregeln des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude QNG 2023 [6] über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks. Die Bearbeitung ist im Abschnitt 4.2 zusammengestellt.

Schritt 3: Darstellung der Ergebnisse / Herausarbeiten der Haupt-CO₂-Treiber

Die Ergebnisse der durchgeführten CO₂-Berechnungen sind in den Abschnitten 4.2 bzw. zusammenfassend in Abschnitt 4.3 dargestellt. Hieraus lassen sich einerseits die Haupt-CO₂-Treiber der Grauen Emission identifizieren, darüber hinaus sind die Ergebnisse in Form von CO₂-Erfahrungswerten auf Bauwerksebene (in kgCO₂ je m³ Bruttorauminhalt bzw. je m² Nettoraumfläche) und auf Bauteilebene (in kgCO₂ je m² Bauteilfläche wie Decken- bzw. Wandfläche) dargestellt, so dass hiermit in frühen Leistungsphasen (LPh. 0 oder 2), in denen noch keine vollständige Entwurfsplanung bzw. Massen vorliegen, der CO₂-Bedarf abgeschätzt werden kann.

Schritt 4: Erarbeitung von Optimierungsvorschlägen hinsichtlich der CO₂-Emission

In Schritt 4 werden Optimierungsvorschläge ausgearbeitet, wie die graue Emission von Hochbauwerken reduziert werden kann. Diese Vorschläge konzentrieren sich im Wesentlichen auf die in Schritt 3 identifizierten Haupt-CO₂-Treiber. Die Bearbeitung bzw. die Ergebnisse sind im Abschnitt 5 zusammengestellt.

Schritt 5: Vergleich der „grauen Emission“ mit dem CO₂ aus dem Bauwerksbetrieb

Im Bearbeitungsschritt 5 sind die CO₂-Emissionen aus dem Bauwerksbetrieb ermittelt worden. Durch Vergleich mit den in den Arbeitsschritten 3 und 4 ermittelten Werten, lässt sich die Größenordnung der „grauen Emission“ besser abschätzen bzw. beurteilen, ob der Fokus bei der CO₂-Reduzierung vornehmlich auf dem Bauwerksbetrieb oder der Gebäudekonstruktion liegen sollte.

3. Grundlagen der CO₂-Berechnungen zur „grauen Emission“

3.1 Allgemeine Grundlagen der CO₂-Bilanzierung von Bauwerken

Die CO₂ Bilanzierung lässt sich als ein Teilaspekt der Ökobilanzierung betrachten, die in den derzeit bedeutendsten Normen für „Umweltmanagement – Ökobilanz“ EN ISO 14040 [7] und DIN EN ISO 14044 [8] geregelt ist. In Rahmen dieser Studie wird die CO₂-Bilanzierung auf eine Sachbilanz innerhalb der Ökobilanz beschränkt und vereinfacht als „CO₂-Berechnung“ bezeichnet. Die Ergebnisse werden der Bewertungsmethodik der DIN EN 15978-1 zufolge ausgewertet. Die theoretischen Grundlagen werden im Folgenden zusammenfassend beschrieben.

Bei der hier sogenannten „CO₂-Berechnung“ handelt es sich um eine Bilanz für das Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) von Bauprodukten und Bauwerken im Verlauf über deren Lebenszyklus. In der DIN EN ISO 14040 gehört das Treibhauspotential unter der Umweltwirkungskategorie „Klimawandel“ zu den wesentlichen Kernindikatoren für die Umweltauswirkungen eines Bauprodukts. Der in dieser Norm definierte Lebenszyklus beinhaltet die Rohstoffgewinnung, die Materialherstellung, die Bauwerkserstellung sowie die Nutzungsphase bis hin zum späteren Rückbau bzw. zur Abfallbehandlung.

Die Maßeinheit des GWP ist CO₂-Äquivalent (nachfolgend CO₂). Hierüber werden die Klimawirksamkeit anderer klimaschädlichen Treibhausgase wie Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) oder die fluorierten Treibhausgase (F-Gase) auf die Wirkung von Kohlendioxid umgerechnet.

Die in diesem Bericht durchgeführten CO₂-Berechnungen ähneln der Sachbilanz einer Ökobilanz-Studie gemäß EN 14040. In der Sachbilanz-Phase wird die Klimaauswirkung von Bauteilen in einzelne Prozessmodule durch die Betrachtung der Input- und Outputflüsse ermittelt. Zu den Inputflüssen zählen beispielsweise Stoffe aus Ressourcen, Vorprodukte und Energieträger sowie Strom. Unter den Outputflüssen fallen bei dieser Betrachtung die Treibhausgas-Emissionen in Luft sowie Nebenprodukten und Abfälle etc.

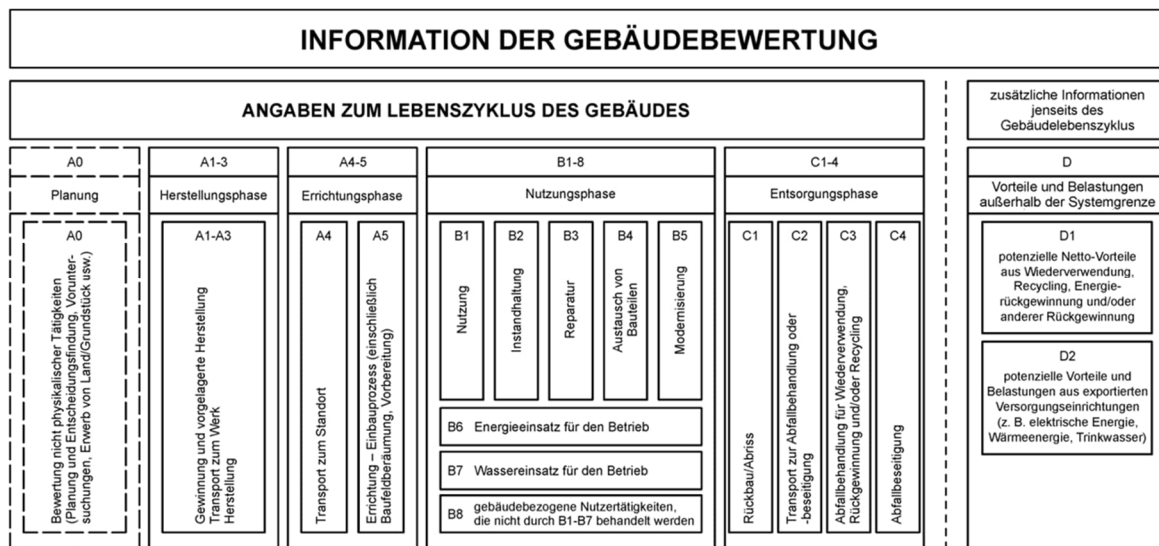


Bild 3.1 Lebenszyklusphasen und Module des Bauwerks gemäß DIN EN 15978-1 – Auszug aus [5], Bild 7, S. 30

Zur Beurteilung der Umweltwirkung der untersuchten Gebäude erfolgt eine Bearbeitung gemäß dem Bewertungsprozess nach DIN EN 15978-1. Es wurden für jedes in der Norm definierte Modul in der jeweiligen Lebenszyklusphase die CO₂-Emissionen nach dem resultierenden Rechenverfahren gemäß [5] getrennt ermittelt und dargestellt. Die Systemgrenze umfasst vier Hauptphasen über den Lebenszyklus von Bauwerken sowie Bauprodukten: die Herstellung der Baustoffe (Phase A, Module A1 bis A3), die Errichtung des Bauwerks (Phase

A, Module A4 bis A5), die Nutzungsphase (Phase B) sowie die Entsorgungsphase (Phase C). Das Recyclingpotential wird im Modul D abgebildet (vgl. Bild 3.1). Zuletzt wurden die CO₂-Emissionen entsprechend den Zielen und Anforderungen der Betrachtung berechnet und aufgeführt, wie z.B. der Ausstoß in der Herstellungsphase A, über die Phasen A bis C oder über alle Phasen von A bis D. Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für die weiterführende Bewertung der Umweltqualität des Bauwerks.

3.2 Konkretisierung bei Hochbauwerken

3.2.1 Allgemeines

Für die CO₂-Bilanzierung von Hochbauwerken gelten die Grundlagen der DIN EN 15978-1 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Teil 1 Umweltqualität“ [5], in Verbindung mit den Bilanzierungsregeln des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude (QNG 2023) [6], das vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) entwickelt wurde. Gemäß diesen Regelwerken setzen sich die gesamten CO₂-Emissionen grundsätzlich aus den folgenden Komponenten zusammen:

- a) Der CO₂-Anteil aus dem Bauwerk, auch „graue Emission“ genannt, der wiederum in zwei Kategorien unterteilt wird:
 - a1: CO₂-Anteil aus Baukonstruktion (gemäß DIN 276 [9] der Kostengruppe 300 zugeordnet)
 - a2: CO₂-Anteil aus technischen Anlagen (gemäß DIN 276 der Kostengruppe 300 zugeordnet)
- b) der CO₂-Anteil aus dem Bauwerksbetrieb, der Emissionen aus Heizen, Lüften, Stromverbrauch etc. umfasst.

Die mit dem Gebäude verbundene emittierte Menge an Treibhausgasen lässt sich wie folgt additiv ermitteln:

$$GWP_{\text{gesamt}} = GWP_K + GWP_T + GWP_N$$

Dabei sind

- GWP_K das Treibhauspotential der Baukonstruktionen (KG 300),
- GWP_T das Treibhauspotential der technischen Anlagen (KG 400) und
- GWP_N das Treibhauspotential des Energieeinsatzes für den Gebäudebetrieb.

Die Bauteile und Baukomponenten in den Kostengruppen KG 300 und KG 400 gemäß DIN 276 gliedern sich wie folgt:

Baukonstruktionen KG 300

- KG 310 Baugrube / Erdbau
- KG 320 Gründung, Unterbau
- KG 330 Außenwände
- KG 340 Innenwände
- KG 350 Decken
- KG 360 Dächer

Technische Anlagen KG 400

- KG 410 Abwasser- und Wasseranlagen
- KG 420 Wärmeversorgungsanlagen
- KG 430 Raumluftechnische Anlagen
- KG 440 Elektrische Anlagen

KG 450 Kommunikations-, Sicherheits- und informationstechnische Anlagen
KG 460 Förderanlagen

Aus den CO₂-Berechnungen lassen sich dann CO₂-Kennwerte auf Gebäudeebene in den Einheiten kgCO₂/(m²·a) und kgCO₂/(m³·a) ermitteln, indem der absolute Wert der CO₂-Emissionen auf die Bezugsfläche sowie auf den Bezugsrauminhalt und die vorher festgelegte Nutzungsdauer des Bauwerks bezogen wird. Als Bezugsfläche und Bezugsrauminhalt dienen in Rahmen dieses Projektes die in der DIN 277 [10] definierte Nettoraumfläche (NRF) und der Bruttorauminhalt (BRI).

In einem separaten Schritt werden die CO₂-Kennwerte auf die Bauteilebene (in der Einheit kgCO₂/m² Bauteilfläche) ermittelt. Dies ermöglicht einen Überblick über den CO₂-Bedarf einzelner Bauteile einschließlich ihres Aufbaus, wie beispielsweise einer Außenwand mit Dämmung und Fassadenbekleidung oder einer Decke mit Fußbodenaufbau und Bodenbelägen.

3.2.2 Ermittlung der CO₂-Anteile aus dem Bauwerk / „graue Emission“

a) Ermittlung der „grauen Emission“ aus den Baukonstruktionen

Zur Berechnung der CO₂-Emissionen des Bauwerkes wurde das in der EN 15978-1 für die Quantifizierung der Umweltindikatoren vorgelegte Rechenverfahren angewendet. Dabei wurden die folgenden Schritte durchgeführt:

Zunächst wurde das Bauwerk in Bauteile und Bauteilkomponenten unterteilt, basierend auf der Gliederung der Kostengruppe KG 300 gemäß DIN 276. Für jede Bauteilkomponenten wurden die verwendeten Baustoffe sowie deren Mengen ermittelt, dabei auch die Austauschhäufigkeit der einzelnen Materialien berücksichtigt wurde.

Anschließend erfolgte für jedes Bauteil eine CO₂-Bilanzierung über alle Phasen des Lebenszyklus. Als Grundlage für die Bilanzierung wurden die Environmental Produkt Deklarationen (EPDs, gemäß DIN EN 15804 [11]) herangezogen. In den EPD-Dokumenten sind die verifizierbaren Umweltinformationen für Produkte, hier im Sinn von Bauteilkomponenten und Baustoffen sowie deren Anwendungen über den Lebenszyklus aufgeführt.

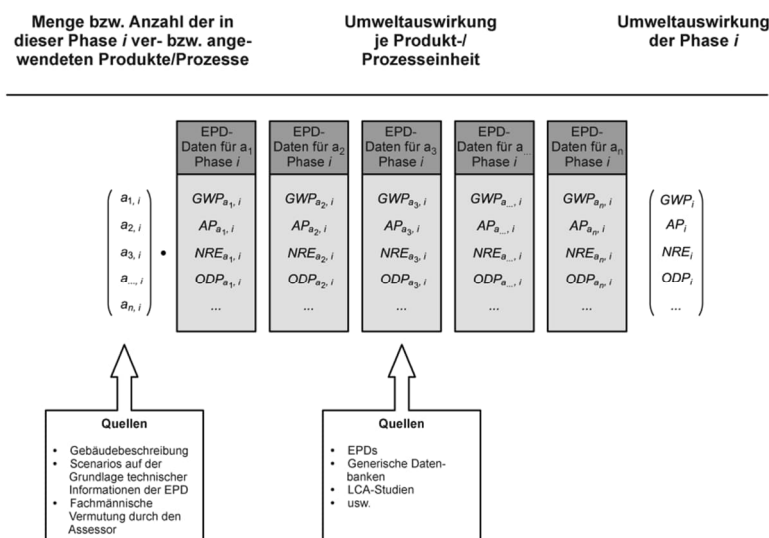


Bild 3.2 Prinzip der Berechnung der CO₂-Emission für Modul i des Gebäudes gemäß DIN 15978-1 – Auszug aus [5], Bild 9, S. 69

Die CO₂-Emissionen des gesamten Bauwerks wurden nach dem Rechenverfahren der EN 15978-1 ermittelt, indem die CO₂-Emissionen aller Bauteile summiert wurden (Bild 3.2).

Schließlich wurden die Ergebnisse in tabellarischer Form zusammengefasst, um eine übersichtliche Darstellung der CO₂-Emissionen des untersuchten Objekts zu ermöglichen.

Die für die Bilanzierung benötigten EPD-Daten wurden überwiegend der ÖKOBAUDAT entnommen. Hier stellt das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) allen Nutzern eine vereinheitlichte Datenbasis für die Ökobilanzierung zur Verfügung (siehe unter www.oekobaudat.de) [12].

Weitere Daten wurden von der Plattform EPD-Online (www.epd-online.com) abgerufen, oder in Einzelfällen wurden Herstellerangaben herangezogen, die vorab kritisch geprüft wurden.

b) Ermittlung der „grauen Emission“ aus den technischen Anlagen

Bei der „grauen Emission“ sind ergänzend auch die technischen Anlagen zu berücksichtigen, die üblicherweise in der Kostengruppe KG 400 nach DIN 276 eingeordnet werden, wie z. B. Wärmeversorgungsanlagen, Lüftungsanlagen und elektrischen Anlagen. Darunter fallen sowohl große Geräte als auch kleine Elementen wie Rohrleitungen, Verteiler, Kabel und Leitungen etc.

Die CO₂-Berechnung der technischen Anlagen eines Gebäudes stellt eine besondere Herausforderung dar, da viele dieser Anlagen und Komponenten oft nicht direkt aus den Planungsunterlagen hervorgehen. Zudem erweist sich eine genaue Massenermittlung als zeitaufwendig und komplex. Diese Schwierigkeiten erfordern eine detaillierte und präzise Erfassung, um die CO₂-Emissionen aller relevanten Bauteile und Anlagen korrekt zu bilanzieren. Im Folgenden ist ein Überblick über die Vorgehensweise in der Fachliteratur und im Anschluss das hier angewendete Vorgehen zusammenfassend erläutert.

▪ Vorgehensweise in der Fachliteratur

In den bereits erstellten Studien wurde der CO₂-Anteil der technischen Anlagen häufig als Pauschalwert im Verhältnis zum CO₂-Anteil der Baukonstruktion abgeleitet. Diese Methode stützt sich auf mehrere Untersuchungen, die entsprechende Orientierungsgrößen aufzeigen. Weißenberger (2016) ermittelte beispielsweise für Wohngebäude in unterschiedlichen Bauweisen – Massivbau, Holzbeton-Verbund und Holzbau – ein Verhältnis, bei dem ein Aufschlag von 10 % bis 25 % für die Gebäudetechnik auf die CO₂-Emissionen der Konstruktion angesetzt wurde [13] (S. 144). Eine detaillierte Analyse eines Bürogebäudes von Schneider-Marin et al. (2019) [14] ergab einen Anteil von etwa 25 %. Die Berechnungen von Mahler et al. (2019) [15], die sechs Typgebäude im Neubau und Bestand mit verschiedenen Kombinationen aus Gebäudehülle und Anlagentechnik umfassen, ergaben einen mittleren Anteil der technischen Anlagen von etwa 30 % der CO₂-Werte der Gebäudekonstruktion. Die DGNB ist im Rahmen ihrer Untersuchung (2021) an 50 Gebäuden von einem pauschalen Aufschlag für die CO₂-Emissionen der Gebäudetechnik von 20 % ausgegangen [4] (S. 13).

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass der CO₂-Anteil der technischen Anlagen in keinem Fall zu unterschätzen ist. Für Wohn- und Bürogebäude mittlerer Größe liegt das Verhältnis zur CO₂-Emission der Baukonstruktion im Bereich von etwa 20 % bis 35 %.

▪ Hier verwendetes Verfahren

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde die Ermittlung der CO₂-Emissionen gemäß den Bilanzierungsregeln des Qualitätssiegels „Nachhaltiges Gebäude“ (QNG) für Wohngebäude sowie für Nichtwohngebäude durchgeführt. Das QNG wurde vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) entwickelt und differenziert die Anforderungen und Betrachtungsweisen für nachhaltiges Bauen je nach Gebäudetyp. Die entsprechenden Bilanzierungsregeln und Systemgrenzen sind in den Anhängen zur ANLAGE 3 definiert, sowohl für Wohngebäude [16] als auch für Nichtwohngebäude [17].

Für die Ermittlung der Bilanzgrößen für die technischen Anlagen ist Abschnitt 6 der jeweiligen Anhänge maßgeblich. Hier werden die relevanten Informationen und Rechenregeln ausführlich beschrieben [16] (S. 13-17) und [17] (S. 15-18).

Demnach erfolgt die Ermittlung des CO₂-Anteils der technischen Anlagen wie folgt:

1. Für große Komponenten, wie z. B. Wärmeerzeugungsanlagen, Lüftungsanlagen, Aufzugsanlagen etc., sind die CO₂-Werten in der separaten Tabelle „Ökobilanzierung – Rechenwerte 2023“ [18] aufgeführt (siehe Bild 3.3). Die Nutzungsdauer der Einzelgeräten und Komponenten wurden auf rechnerische Austauschzyklen über einen Zeitraum von 50 Jahren umgerechnet und in der Tabellen 8 bis 11 der Anhänge [16; 17] dokumentiert (siehe Bild 3.4)

| Teil A: Tabelle 1.1. Rechenwerte für Bauprodukte | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|---------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| CODE Datensatzbezeichner | Technische Angaben | | | | | | Indikatorenwerte | | | |
| | Deklarier te Einheit | Gewicht | Rohdichte (kg/m ³) | Flächengewicht (kg/m ²) | Längengewicht (kg/m) | Umrechnungsfaktor pro 1 kg | GWP A1-A3 kg CO ₂ -Äquival. | GWP C3 kg CO ₂ -Äquival. | GWP C4 kg CO ₂ -Äquival. | GWP D1 kg CO ₂ -Äquival. |
| 10 Haustechnik Großkomponenten | | | | | | | | | | |
| 10.1 Gas-Brennwertgerät < 20 kW (Wandgerät) | Stück. | 43 | | | | 43 | 243,6 | 7,1 | 0,5 | -59,3 |
| 10.2 Gas-Brennwertgerät 120-400 kW (Standgerät) | Stück. | 974 | | | | 974 | 3.422,4 | 161,5 | 1,8 | -1.357,7 |
| 10.3 Gas-Brennwertgerät 20-120 kW (Standgerät) | Stück. | 283 | | | | 283 | 1.268,3 | 46,7 | 1,8 | -392,7 |
| 10.4 Gas-Niedertemperaturgerät 20-120 kW (Standgerät) | Stück. | 292 | | | | 292 | 1.104,2 | 22,7 | 1,6 | -157,7 |
| 10.5 Hackschnitzkessel < 20 kW | Stück. | 631 | | | | 631 | 1.642,0 | 3,5 | 1,8 | -683,5 |
| 10.6 Hackschnitzkessel 120 - 400 kW | Stück. | 3399 | | | | 3399 | 7.141,5 | 18,8 | 1,8 | -3.691,6 |
| 10.7 Hackschnitzkessel 20 - 120 kW | Stück. | 921 | | | | 921 | 2.218,2 | 5,1 | 1,8 | -998,7 |

Bild 3.3 Beispiele CO₂-Werte für Einzelkomponenten technischer Anlagen über den Lebenszyklus – Auszug aus der Tabelle „Ökobilanzierung – Rechenwerte 2023“ [18]

| Komponente | CODE ¹⁶ | Austauschzyklus ¹⁷ |
|--|--------------------|-------------------------------|
| Gas-Brennwertgerät < 20 kW (Wandgerät) | 10.1 | 2 |
| Gas-Brennwertgerät 20-120 kW (Standgerät) | 10.3 | 2 |
| Gas-Brennwertgerät 120-400 kW (Standgerät) | 10.2 | 2 |
| Gas-Niedertemperaturgerät 20-120 kW (Standgerät) | 10.4 | 2 |
| Öl-Brennwertgerät < 20 kW (Wandgerät) | 10.8 | 2 |
| Öl-Brennwertgerät 20-120 kW (Standgerät) | 10.10 | 2 |
| Öl-Brennwertgerät 120-400 kW (Standgerät) | 10.9 | 2 |
| Öl-Niedertemperaturgerät 20-120 kW (Standgerät) | 10.11 | 2 |

Bild 3.4 Beispiele Austauschzyklen der Einzelkomponenten technischer Anlagen – Auszug aus [16; 17]

2. Alle darüber hinausgehenden kleineren Elementen der technischen Gebäudeausrüstung, wie Sanitärobjekte, Rohrleitungen, Kabel und Leitungen etc. (Bild 3.5) werden durch die folgenden pauschalen Sockelwerte in Abhängigkeit von der Netto-Raumfläche des Gebäudes erfasst (Tabelle 1).

| Kostengruppe | Im Sockelbetrag pauschal erfasste Bauteile |
|--------------|--|
| 410 | Steig- und Fallrohrleitungen, Anschlussleitungen für Wohnungen und alle Sanitärobjekte |
| 420 | Rohrleitungen, Verteiler für Raumheizflächen, Raumheizflächen |
| 430 | Rohrleitungen, Verteiler, Anschlussleitungen Lüftung |
| 440 | Niederspannungshauptverteiler, Kabel, Leitungen, Unterverteiler |
| 450 | Leerrohre, Kabel, Leitungen, Personenrufanlagen, Lichtruf- und Klingelanlagen, Türsprech- und Türöffneranlagen |

Bild 3.5 Übersicht der im Sockelbetrag pauschal erfasste Bauteile – Auszug aus [16], Tabelle 5, S. 13

Tabelle 1 Pauschale Sockelwerte der CO₂-Emissionen für TGA gemäß QNG 2023 [16] (Tabelle 6 und 7) und [17] (Tabelle 7.1)

| | Wohngebäude kgCO ₂ /(m ² _{NRF} ·a) | Nichtwohngebäude LCA-Klasse 1 kgCO ₂ /(m ² _{NRF} ·a) |
|-------------------------|--|--|
| Module A1-A3, B4, C3-C4 | 1,20 - 1,30 | 1,23 - 1,72 |
| Modul D1 | (-0,52) - (-0,61) | (-0,62) - (-0,86) |
| A bis D | 0,68 - 0,69 | 0,68 - 0,86 |

Die CO₂-Emission der im Sockelbetrag erhaltenen Elemente lässt sich durch die folgende Formel ermitteln:

$$GWP\text{-Sockel} = k_{\text{Sockel}} \times NRF_{\text{Gebäude}}$$

Wobei

k_{Sockel} Sockelbetrag aus der Tabelle 1

$NRF_{\text{Gebäude}}$ Netto-Raumfläche des Gebäudes

Die Gesamt-CO₂-Emissionen GWP_T aus den technischen Anlagen ergeben sich dann aus der Summe des Anteils der pauschalen Beträge und der relevanten Geräte:

$$GWP_T = GWP\text{-Sockel} + GWP\text{-Einzelanlagen}$$

- Eigene Berechnung des CO₂-Anteils der technischen Anlagen

Im Rahmen dieser Projektarbeit wurde der CO₂-Anteil der technischen Anlagen (TGA) für zwei ausgewählte Gebäude ermittelt - das Unterkuftsgebäude (Unt1) und das Mehrfamilienhaus (Woh4) -, die über eine ausreichende Datenlage verfügten. Die Berechnung erfolgte nach dem zuvor beschriebenen QNG-Verfahren und wurde sowohl für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren als auch für eine erweiterte Betrachtung von 100 Jahren durchgeführt. Die ermittelten CO₂-Emissionen der TGA (KG 400) wurden anschließend prozentual auf die CO₂-Emissionen der Baukonstruktion (KG 300) bezogen, um diese mit den Angaben der früheren Untersuchungen zu vergleichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2 Verhältnis der CO₂-Emissionen der TGA zu den CO₂-Emissionen der Gebäudekonstruktion in den beiden berechneten Gebäuden

| | | Unt1 | Woh4 |
|---|-----------|---|---|
| CO ₂ -Bilanz der TGA über die Phasen A-C | | 1,44 kgCO ₂ /m ² -a | 1,30 kgCO ₂ /m ² -a |
| Verhältnis zu KG 300 | 50 Jahre | 18% | 15% |
| | 100 Jahre | 32% | 22% |
| CO ₂ -Bilanz der TGA über die Phasen A-D | | 0,77 kgCO ₂ /m ² -a | 0,69 kgCO ₂ /m ² -a |
| Verhältnis zu KG 300 | 50 Jahre | 10% | 8% |
| | 100 Jahre | 20% | 12% |

Hiernach liegen die CO₂-Emissionen der TGA bei einer Lebensdauer der Gebäude von 50 Jahren im Bereich von 10 % - 20 %. Die Werte sind damit geringer als Ergebnisse aus Studien in [4; 14; 15], in denen bei Bürogebäuden für die TGA CO₂-Werte von 20 % - 30 % der Baukonstruktion angegeben wird. Diese Differenz lässt sich durch die höheren Anforderungen an die technische Gebäudeausstattung in Bürogebäuden erklären. Insbesondere werden in Bürogebäuden häufig komplexere Lüftungs- und Heizsysteme benötigt, die größer dimensioniert und energieintensiver sind als in Wohngebäuden, was zu einem hohen CO₂-Anteil im Vergleich zur Baukonstruktion beiträgt.

Weiter zeigen die Ergebnisse in Tabelle 2, dass das Verhältnis der CO₂-Emissionen der TGA zur Baukonstruktion bei einer Lebensdauer von 100 Jahren auf etwa 15 % - 35 % ansteigt. Dieser Anstieg lässt sich darauf zurückführen, dass TGA-Geräte und -Komponenten in der Regel eine kürzere Lebensdauer haben und daher über einen langen Betrachtungszeitraum mehrfach ausgetauscht und ersetzt werden müssen. Im Gegensatz dazu bleiben die tragenden Bauteile der Konstruktion, die in der Regel eine Lebensdauer von 100 Jahren oder länger haben, weitgehend unverändert.

- Zusammenfassung und Ausblick

Der CO₂-Anteil der technischen Gebäudeausstattung (TGA) ist in jedem Gebäude sehr individuell und variiert je nach Art und Umfang der installierten Systeme. In den frühen Planungsphasen (LPh. 0 und LPh. 2) fehlen häufig wichtige Informationen über die TGA oder diese liegen nur ungenau vor. Besonders die Ermittlung des Stoffverbrauchs einzelner, kleinerer Elemente ist schwierig. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes auf das vereinfachte Verfahren mit den pauschalen Sockelwerte zurückgegriffen. Da es im Rahmen der vorliegenden Untersuchung um grundsätzliche Aussagen geht, scheinen die hieraus resultierenden Genauigkeitsverluste akzeptabel.

In den folgenden Abschnitten liegt der Fokus der Untersuchung auf der CO₂-Emission der Gebäudekonstruktion (KG 300), die „grauen Emissionen“ der technischen Anlagen (KG 400) werden zunächst nicht weiter berücksichtigt. Würden sie dennoch in die CO₂-Bilanzierung einfließen, scheint nach den eigenen Auswertungen sowie den Auswertungen in der Literatur ein pauschaler Aufschlag von 20 % für Wohngebäude und 30 % für Bürogebäude eine sinnvolle Größenordnung zu sein. Diese Werte gelten für eine CO₂-Bilanzierung über alle Phasen A bis D und eine Lebensdauer von 100 Jahren.

In den folgenden Abschnitten wird der Fokus ausschließlich auf die CO₂-Emissionen aus der Baukonstruktion (KG 300) gelegt.

c) Nutzungsdauer des Bauwerks

In Ökobilanzen und CO₂-Berechnungen gemäß Regelwerken wie DGNB, BNB und QNG wird üblicherweise eine Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren zugrunde gelegt. Da die Zielsetzung im Sinne einer CO₂-Minimierung jedoch sein muss, möglichst dauerhaft zu konstruieren und die Bauwerke möglichst lange zu nutzen, wurde im Rahmen des vorliegenden Berichtes von einer Lebensdauer von 100 Jahren ausgegangen. Dieser Zeitraum ist auch planmäßig durch gängige Bemessungsnormen abgesichert.

Zur Untersuchung verschiedener Parameter wurde die Nutzungsdauer jedoch mit 50, 100, 150 und 200 Jahren variiert (siehe Abschnitt 5.3).

d) Nutzungsdauer bzw. Austauschhäufigkeit von Bauteilen

Da nicht nur die Erstellung der Bauwerke CO₂-mäßig bilanziert wird, sondern der gesamte Lebenszyklus bis zum späteren Rückbau, ist zu berücksichtigen, dass mit Ausnahme der Tragkonstruktion nahezu alle Bauteile (Fußbodenbeläge, Fenster, Türen etc.) innerhalb der Nutzungsdauer des Bauwerks mehrfach ausgetauscht werden müssen und somit in entsprechender Anzahl in die Bilanz einfließen.

Die Abschätzung der Nutzungsdauer kann basierend auf der Faktor-Methode oder der Kennwert-Methode erfolgen. Bei der Faktor-Methode wird gemäß DIN ISO 15686 [19] eine theoretische Nutzungsdauer basierend auf Einzelfaktoren multiplikativ ermittelt, die jeweils von der Bauteilqualität, der Qualität der Bauausführung, mechanischen oder bauphysikalischen Auswirkungen abhängen. Deutlich pragmatischer ist die Kennwertmethode, die im Rahmen der vorliegenden Bearbeitung zur Anwendung gekommen ist. Hier wird die Nutzungsdauer basierend auf Erfahrungswerten (ggf. als Mittelwert einer Spannweite) angegeben. Hierzu sind die folgenden Quellen herangezogen worden:

- BBSR-Tabelle Nutzungsdauern: „*BNB Nutzungsdauer von Bauteilen (2017)*“ unter Berücksichtigung der „*Änderungsübersicht BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)*“, [20],
- Angaben von Bauproduktherstellern in den EPDs,
- IBO Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie GmbH: „*Erweiterung des O13-Index um die Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen*“ (Endbericht, 2009) [21],
- Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe: „*Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte (2019)*“ [22],
- Erfahrungswerte von verschiedenen Websites wie der Plattform für Bauplaner und Handwerker (<https://baumensch.de/baumensch.de/>), der BauNetzWissen (<https://www.baunetzwissen.de/>), etc. sowie von unterschiedliche Herstellern und Beratern bezüglich spezifischer Bauprodukte in den jeweiligen Bereichen der Hochbauwerke.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Spannweite der einzelnen Werte bzw. die im Rahmen des Projektes letztlich angesetzte Lebensdauer.

Tabelle 3 Hochbauwerke – Nutzungsdauer von Bauteilen und Baukomponenten

| Bauteilgruppen | Bauteile / Baustoffe | BNB (BBSR 2017) | Hersteller- angabe / EPD | IBO | BTE und andere Quellen*: von-bis / Mittelwert | angesetzt |
|----------------------------|--|-----------------|--------------------------------|--------------|---|-----------|
| 320 Gründung | 322 Flachgründungen | > 50 | | | 80 - 120 / 100 | 100 |
| | 323 Tiefgründungen | > 50 | | | 80 - 120 / 100 | 100 |
| | 324 Unterböden und Bodenplatte | > 50 | | | 80 - 120 / 100 | 100 |
| | Sonstiges | 35 | | | 25 - 60 / 40 | |
| | OS 8 - Beschichtung | - | | | | 10 |
| | PU Beschichtung , Epoxidharzbeschichtung | - | | | | 15 |
| 330 Außenwand | 331 tragende AW | | | | | |
| | Mauerwerk, Beton, Stahl | > 50 | | 100 | 90 - 100 | 100 |
| | Holz | > 50 | | 100 | 50 - 80 | 100 |
| | 333 Außenstützen | | | | | |
| | Mauerwerk, Beton, Stahl | > 50 | | | 90 - 100 | 100 |
| | Holz | > 50 | | | 50 - 80 | 100 |
| | 334 Fenster | | | | | |
| | Fenster aus Alu, Stahl, Laubholz behandelt | > 50 | 50 | | 40 | 30 |
| | Fenster aus Kunststoff, Nadelholz behandelt | 40 | 50 | | 30 | 30 |
| | Pfosten-Riegelfassade mit 3-fach Verglasung | - | 50 | | 50 | 50 |
| | 335 AW-Verkleidungen | | | | | |
| | Dämmung erdberührter Bauteile: Schaumglas | > 50 | | 40 - 62 / 50 | | 50 |
| | Dämmung erdberührter Bauteile: Extrudiertes Polystyrol | 40 | | 30 - 55 / 45 | | 50 |
| | Wärmedämmstoffe: PU, Zellulose-Wolle, Schaumglas | - | | 40 - 50 | 40 / 30 / 50 | 50 |
| | WDVS mit: Mineralwolle, Polyurethan, Holzfaser | 40 | | 50 | 20 - 40 / 30 | 40 |
| | Dämmsicht als Kerndämmung | > 50 | | | 40 / 30 / 50 | 50 |
| | Dämmschicht hinter Vorsatzschale hinterlüftete | > 50 | | | | 50 - 100 |
| | Außenputz: Kalkzementputz | 30 / 40 / 45 | | 50 | 50 | 50 |
| | Anstrich: Fassadenfarbe | - | | 10 | 5 bis 10 | 10 |
| | Holzbekleidung behandelt / unbehandelt | 40 / 30 | | 40 | 30 | 30 |
| | Metallbekleidungen: Alu, Stahl nicht rostend, Kuperblech | > 50 | | | 50 / 60 / 70 | 100 |
| | Metallbekleidung: Stahl galvanisch verzinkt | 40 | | 40 | 40 | 50 |
| Klinkerbekleidung | > 50 | 150 | | 90 | 100 | |
| 340 Innenwände | 341 tragende IW | | | | | |
| | Mauerwerk, Beton | > 50 | | 100 | 100 | 100 |
| | Holz weich - hart | > 50 | | 100 | 50 / 80 | 100 |
| | 342 nicht tragende IW | | | | | |
| | Mauwerkwerk, Beton, Holz | > 50 | | 100 | | 100 |
| | Holzständerwand | > 50 | | 50 | | 100 |
| | Metallständersysteme, Gips-Wandbauplatten | > 50 | | 60 | 40 | 50 |
| | 343 Innenstützen | | | | | |
| | Mauerwerk, Beton, Holz, Stahl | > 50 | | | | 100 |
| | 344 Innentüren und -fenster | | | | | |
| | Standard-Türen aus Holz, Alu, Kunststoff, Stahl, Glas | > 50 | | | 60 - 40 / 40 / 50 | 50 |
| | 345 IW-Bekleidungen | | | | | |
| | Standard-Innenputze: Kalkgipsputz, Gipsputz | > 50 | | 100 | 40-80 | 100 |
| Anstrich: Dispersionsfarbe | - | | | 15 | 15 | |

| Bauteilgruppen | Bauteile / Baustoffe | BNB (BBSR 2017) | Hersteller-angabe / EPD | IBO | BTE und andere Quellen*: von-bis / Mittelwert | angesetzt | |
|--|--|--------------------------------------|-------------------------|---------|---|-----------|-----|
| 350 Decken | 351 Deckenkonstruktionen | | | | | | |
| | Betondecken | > 50 | | 100 | 100 | 100 | |
| | Holzdecken: Massivholzdecke, Holzbalken, HBV | > 50 | | 100 | 70 / 80 | 100 | |
| | Metalldecken: Stahlverbunddecke, Stahlträgerdecke | > 50 | | 75 | 80 | 100 | |
| | Steindecke, Kappendecke | > 50 | | | 80 | 100 | |
| | 352 Deckenbeläge | | | | | | |
| | Zementestrich / Estrich, schwimmend | > 50 | | 60 | 50 | 50 | |
| | Trockenestrich (Systeme): Holz-, Gipsfaser-, Gipskartonplatten | > 50 | | 60 | | 50 | |
| | Trittschalldämmung, Fußbodendämmung | > 50 | | 50 | 50 | 50 | |
| | textile Beläge | 10 | | | 5 | 10 | |
| | Laminat-Holz, PVC, HDF-Vinylboden | 20 | | | 15 - 25 | 20 | |
| | Kautschuk | 20 | 30 | | | 30 | |
| | Massivholzparkett, Vollholzparkett, Holzdielen | > 50 | | | 60 - 80 | 50 | |
| | Naturstein, Natursteinfließen | - | 100 | | 60 - 80 / 30 - 60 / 40 | 100 | |
| | Fliesenbelag | - | 50 | | | 50 | |
| | trockene Hohlbodensystem mit Gipsfaserelemente | - | | | | 50 | |
| | 353 Deckenbekleidung | | | | | | |
| | Gipskartonbekleidung | > 50 | | | 50 | 100 | |
| | Akustikdecken, Akustikschaum, Schallabsorber | 40 | | | | 50 | |
| | Unterkonstruktionen: Trockenbauprofile aus Holz, Stahl | > 50 | | | 60 / 40 | 50 | |
| | Dämmung der Kellerdecke | > 50 | | | | 50 | |
| | 360 Dächer | 361 Dachkonstruktion | | | | | |
| | | geneigte Dachkonstr. aus Holz, Stahl | > 50 | | | 80 | 100 |
| 363 Dachbeläge | | | | | | | |
| Abdichtungshbahnen untersch. Sorte | | 40 / 30 / 20 | | 20 - 30 | 30 / 25 / 15 | 25 - 40 | |
| Dacheindeckung: Dachstein, Dachziegel, Beton | | > 50 | 100 | 70 - 80 | 70-100 | 100 | |
| Dämmschicht als Auf- und Zw.sparrendämmung | | > 50 | | | | 50 | |
| Terrassedielen Holz - Außen, ohne Holzschutz | | - | | | | 15 | |
| 364 Dachbekleidungen | | | | | | | |
| Unterdach: Bitumen-Holzfaserpaltten | > 50 | | 50 | | 50 | | |
| Zwischen-, Auf- und Untersparrendämmung | > 50 | | 50 | | 50 | | |

Die Austauschhäufigkeit einzelner Bauteile oder Baukomponenten wurde nach dem in der DIN EN 15978-1 geregelten Modell „ganzzahlige Austauschhäufigkeit“ ermittelt. Die Berechnung erfolgt nach der folgenden Formel:

$$NR(j) = E [ReqSL / ESL(j) - 1]$$

- Dabei ist
- NR(j) die Austauschhäufigkeit für Produkt j
 - E [...] Auf- oder Abrunden-Funktion
 - ReqSL die geforderte Nutzungsdauer des Bauwerks
 - ESL(j) die voraussichtliche Nutzungsdauer des Produktes j

Die Auf- oder Abrundung des Wertes NR(j) wird unter Berücksichtigung der tatsächlichen Wahrscheinlichkeit des geplanten Austauschs von dem Produkt entschieden.

e) Besonderheiten beim Baustoff Holz

Der Baustoff Holz weist in der CO₂-Bilanz einige Besonderheiten auf. Während bei anderen üblichen, künstlich hergestellten Baustoffen wie Beton, Stahl oder Mauerwerk der Großteil der CO₂-Emissionen über die gesamte Lebensdauer hinweg in der Herstellungsphase (Module A1 bis A3) entsteht – bedingt durch z. B. energieintensive Produktionsschritte wie Brenn- oder Schmelzprozesse – verhält es sich bei Holz anders. (Bild 3.6)

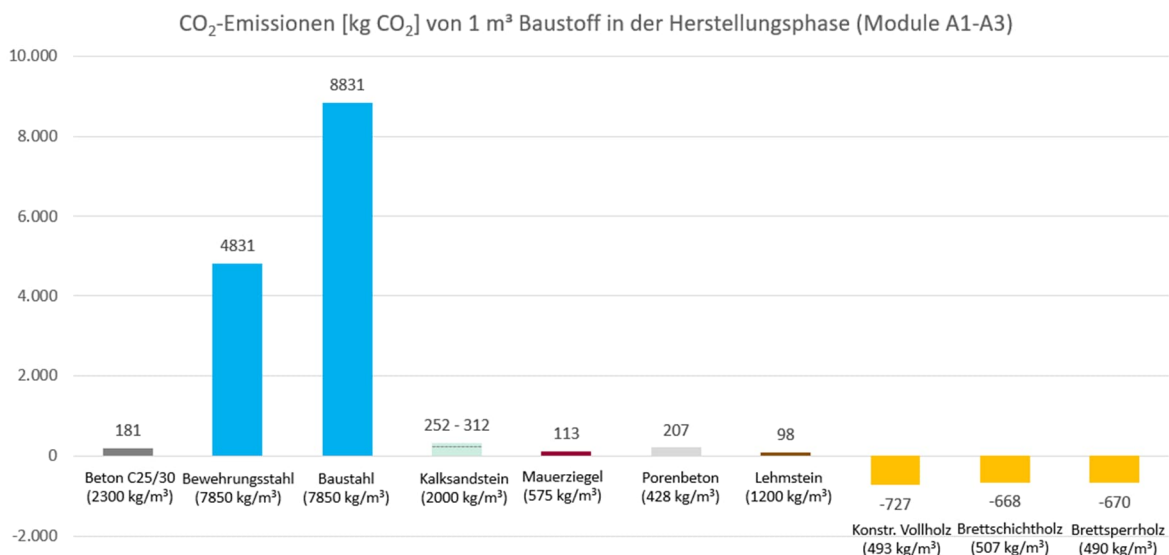


Bild 3.6 CO₂-Emission typischer Baustoffe in der Produktionsphase (Module A1-A3)

Bei Holz handelt es sich um einen natürlichen Baustoff, der während seiner Wachstumsphase CO₂ aus der Atmosphäre aufnimmt und als biogenen Kohlenstoff speichert. Dieses CO₂ bleibt über die gesamte Lebensdauer des Holzes gebunden und wird erst bei der Verrottung oder Verbrennung wieder freigesetzt.

In diesem Abschnitt wird Konstruktionsvollholz (KVH) als Beispiel betrachtet. Laut den im ÖKOBAUDAT bereitgestellten Daten, die vom Thünen-Institut für Holzforschung (Hamburg) für KVH (Durchschnitt DE) veröffentlicht wurden [23], wird das im Holz gespeicherte CO₂, das sogenannte GWP-biogene CO₂, bei der Rohstoffbereitstellung (Modul A1) mit einem negativen Wert von ca. -806 kgCO₂/m³ Holz in der CO₂-Bilanz berücksichtigt. Nach Einbezug der fossilen Emissionen, die durch Verarbeitungsschritte wie Fällen, Transport und Trocknung entstehen und in der CO₂-Bilanzierung dem GWP-fossil-Anteil zugerechnet werden, ergibt sich für Konstruktionsvollholz in der Herstellungsphase (Module A1 bis A3) ein negativer CO₂-Wert von -723,4 kgCO₂/m³ Holz.

Gemäß dieses Ansatzes [23] wird das im Holz gespeicherte biogene CO₂ in der Abfallbehandlung (Modul C3) vollständig freigesetzt, entweder durch Verbrennung oder Verrottung, um den natürlichen Kohlenstoffkreislauf zu gewährleisten.

Diese Bilanzierungsmethodik basiert auf dem „-1/+1“-Ansatz, bei dem am Systemeintritt (Phase A) der biogene Kohlenstoff, der im Holz gebunden ist, als negativer Wert angesetzt wird und am Systemaustritt (Phase C) dieser Menge wieder an die Atmosphäre abgegeben wird. Dadurch wird der natürliche Kohlenstoffkreislauf abgeschlossen. Dieser Ansatz ist oftmals in aktuellen Regelwerken wie der EN 15804 (2019), EN 16485 (2014) und ISO 14067 (2018) zur Ökobilanzierung von Holz empfohlen [24].

Betrachtet man ausschließlich die Phasen A bis C, ergibt sich für 1 m³ Konstruktionsvollholz eine CO₂-Bilanz von 95,2 kgCO₂/m³. Dieser Wert liegt nur geringfügig unter dem für Mauerziegel, dessen CO₂-Bilanz für Phasen A bis C bei etwa 110 kgCO₂/m³ liegt.

Häufig wird im Modul D (Recyclingphase) eine thermische Verwertung von Holz als Standardszenario angenommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass Holz am Ende seiner Lebensdauer als Energieträger fossile Brennstoffe wie Kohle, Öl oder Erdgas ersetzt. Die im Modul D ausgewiesene CO₂-Einsparung entspricht der Menge an CO₂-Emissionen, die vermieden würden, wenn stattdessen fossile Energieträger zur Erzeugung der gleichen Energiemenge (in MJ) für Wärme und Strom verwendet worden wären.

Dieser Einspareffekt wird gemäß ÖKOBAUDAT mit einem Abzugswert von -283,1 kgCO₂/m³ für Konstruktionsvollholz angerechnet. Dadurch ergibt sich über den gesamten Lebenszyklus (Phasen A bis D) für Holz in vielen Szenarien eine CO₂-Bilanz mit einem insgesamt negativen Abzugswert von -187,9 kgCO₂/m³.

In einem alternativen Recycling-Szenario wird Altholz stofflich weiterverwertet, beispielsweise in der Herstellung neuer Produkte. In diesem Fall wird eine Gutschrift von -12,87 kgCO₂/m³ berücksichtigt (siehe Bild 3.7).

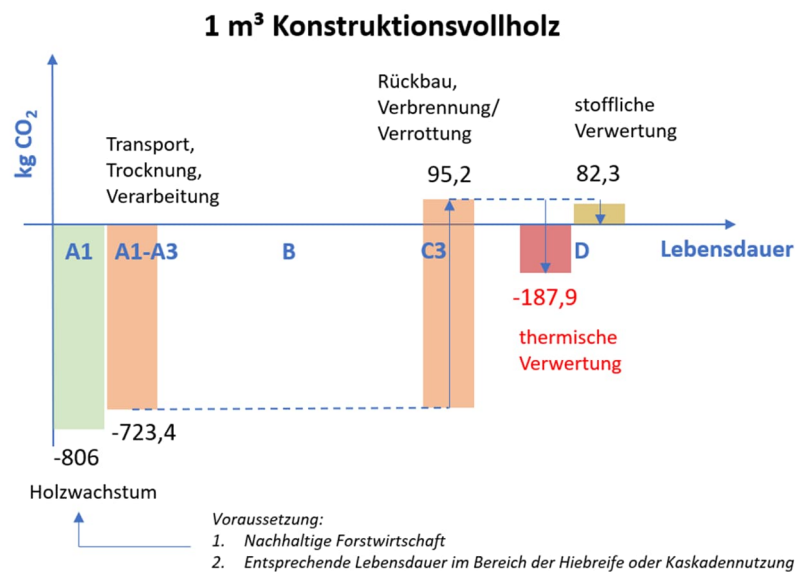


Bild 3.7 CO₂-Bilanz von 1 m³ Konstruktionsvollholz über die Lebensdauer (schematische Darstellung)

Im Vergleich zu anderen gängigen künstlichen Baustoffen böte Holz signifikante Vorteile, sowohl bei der Betrachtung der reinen Herstellungsphase des Bauwerks (siehe Bild 3.6), als auch über die gesamte Lebensdauer hinweg (-187,9 kgCO₂/m³ bei thermischen Verwertung). Aus rein bilanzieller Sicht könnte dies den Eindruck erwecken, dass es vorteilhaft wäre, möglichst viel Holz zu verwenden und Gebäude mit geringerer Lebensdauer zu errichten, um durch den Ersatzneubau erneut den negativen CO₂-Abzugswert anrechnen zu können. Ein solches Vorgehen ist jedoch physikalisch und ökologisch nicht sinnvoll.

Nach Meinung der Autoren ist daher der folgende alternative Rechenansatz, den Baustoff Holz in der CO₂-Bilanz zu berücksichtigen, zielführender:

- Als Systemeintritt wird der Zustand des ausgewachsenen Baumes (Baum A) betrachtet. Die CO₂-Bilanzierung beginnt mit einem Nullwert, der als Nullzustand definiert wird. Wird der Baum gefällt, abtransportiert, getrocknet und zu Bauholz weiterverarbeitet, entstehen hierdurch CO₂-Emissionen, die in der Bilanz erfasst werden.
- Wenn das Holz aus Deutschland oder aus anderen Ländern mit einem vergleichbaren Prinzip hinsichtlich einer nachhaltigen Forstwirtschaft stammt, kann davon ausgegangen werden, dass für jeden gefällten Baum ein Neuer (ein Baum B) gepflanzt wird. Während seines Wachstums nimmt Baum B CO₂ aus der Atmosphäre auf und speichert es. Der CO₂-Abzugswert, der dem Holzprodukt aus Baum A in der Bilanz angerechnet wird, baut sich sukzessive während der Wachstumszeit von Baum B auf.

Am Ende der Hiebreife, die näherungsweise zu 80 Jahren angenommen wird, kann dann der volle Abzugswert von -806 kgCO₂/m³ (GWP-biogen) für das Holzprodukt aus Baum A gerecht in der CO₂-Bilanz angesetzt werden. Ist die Nutzungsdauer des Bauwerks jedoch kürzer als die Hiebreife von 80 Jahren (was z.B. bei direkt bewitterten Bauwerken der Nutzungsklasse 3 durchaus üblich ist) reduziert sich der Abzugswert unter der Annahme eines annähernd über die Zeitachse linearen CO₂-Aufnahmevermögens auf $-806 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3 \times \text{Lebensdauer} [\text{Jahre}] / 80 [\text{Jahre}]$.

- In der Entsorgungsphase (Phase C) des Holzes aus Baum A wird davon ausgegangen, dass der darin gebundene Kohlenstoff durch Verrottungsprozesse, Verbrennungsprozesse etc. wieder entweicht.
- In der Recyclingphase (Phase D) wird Holz hier bewusst einer stofflichen Verwertung im Rahmen einer mehrstufigen Kaskadennutzung zugeführt. Solange das Holz in Form eines nutzbaren Stoffes verbleibt, speichert es weiterhin das gebundene CO₂. Nach dem Ende des Betrachtungsraums des Holzprodukts wird diese CO₂-Menge nicht sofort freigesetzt, wie es bei der energetischen Verwertung durch Verbrennung der Fall wäre. Dies trägt dazu bei, das CO₂-Restbudget langfristiger einzusparen. Die stoffliche Verwertung von Holz entspricht auch den Strategien und Empfehlungen des Umweltbundesamts zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung.

Der neue Ansatz basiert auf dem sogenannten „0/0-Ansatz“ [24]. Darüber hinaus weist er Ähnlichkeiten mit dem Modell von Cherubini et al. (2012) [25] und Guest et al. (2013) [26] auf, die auch im Bericht von Windsperger (2015) [27] (S. 47) beschrieben sind. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch darin, dass Cherubini und Guest das Holz am Ende der Lebensdauer energetisch verwerten, während im neuen Ansatz eine stoffliche Verwertung erfolgt.

Dieser Rechenansatz weist die folgenden Vorteile auf:

1. Zeitlich dynamische Betrachtung: Der CO₂-Wert, der in der CO₂-Bilanz für Holz angerechnet wird, hängt von der Nutzungsdauer des Holzprodukts ab und wird dynamisch an die tatsächliche Lebensdauer angepasst, durch den grob geschätzten Faktor: $\text{Lebensdauer} [\text{Jahre}] / 80 [\text{Jahre}]$
2. Vermeidung physikalisch unsinniger Ergebnisse: Dies tritt insbesondere dann auf, wenn bei der Bilanzierung von Holzprodukten ausschließlich die Phase A bzw. die Phasen A bis D (Holz mit thermischer Verwertung in Phase D) betrachtet werden.
3. Auswirkung einer geringeren Nutzungsdauer: Wenn die Nutzungsdauer des Holzprodukts unterhalb der Hiebreife des Baumes liegt, wirkt sich folgerichtig negativ auf die CO₂-Bilanz aus. Denn für den Ersatzneubau ein neuer Baum gefällt werden muss, bevor der ursprünglich gepflanzte Baum nachgewachsen ist.

In Bild 3.8 werden die CO₂-Emissionen von Konstruktionsvollholz und Brettschichtholz in den jeweiligen deklarierten Modulen gemäß ÖKOBAUDAT sowie nach dem vorgeschlagenen Ansatz gegenübergestellt.

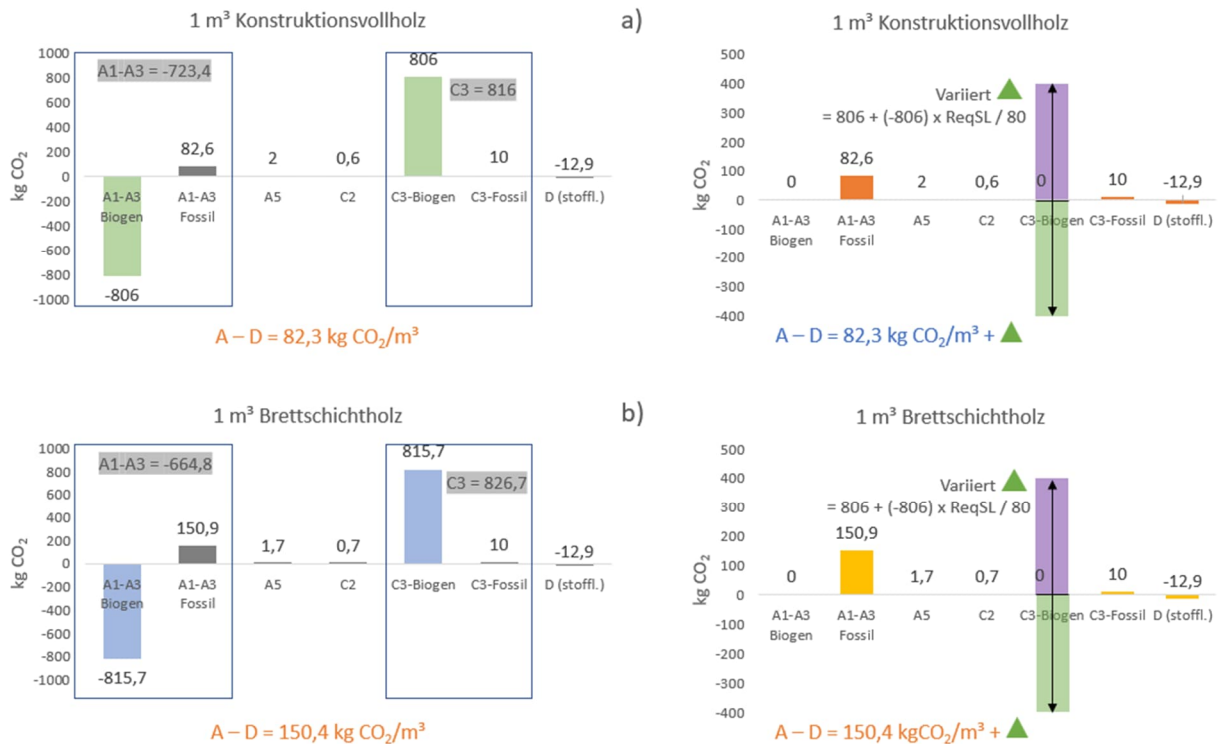


Bild 3.8 CO₂-Emission von Holz nach ÖKOBAUDAT (links) und nach dem vorgeschlagenen Ansatz (rechts) - a) Konstruktionsvollholz / b) Brettschichtholz

Im Zuge der Auswertung wird vergleichend die Vorgehensweise nach ÖKOBAUDAT bzw. die hier vorgeschlagene Vorgehensweise angewendet (siehe Abschnitt 5.5 und 5.6)

3.2.3 CO₂-Anteil aus Bauwerksbetrieb

Der betriebs- und nutzungsbedingte Anteil ergibt sich während der Nutzung des Gebäudes durch die Umrechnung des Energieverbrauchs in Treibhausgasemissionen. Für die Berechnung ist der Endenergiebedarf des Gebäudes heran zu ziehen, der für Warmwasser, Heizung, Lüftung sowie den Strombedarf der Nutzer umfasst. Die Umrechnung in CO₂-Emissionen erfolgt mit dem entsprechenden Emissionsfaktor des jeweiligen verwendeten Energieträgers.

Die genaue Vorgehensweise ist in Abschnitt 6 dargestellt.

4 Ermittlung der „grauen Emission“ aktueller Hochbauwerke

4.1 Auswahl der Gebäude

Für die CO₂-Berechnungen wurden in Zusammenarbeit mit den Praxispartner zunächst neun aktuelle sowie reale und landestypische Bauwerke in konventioneller Massivbauweise ausgewählt. Diese wurden in drei Kategorien eingeteilt:

- Büro- und Verwaltungsgebäude,
- Unterkunftsgebäude und
- Wohngebäude.

Für alle Bauwerke lagen ein Ausführungsplanungen mit den entsprechenden Massen vor. Die meisten Gebäude erfüllen den Energiestandard EnEV 2016 oder höhere Anforderungen.

Die getroffene Auswahl der Bauwerke umfasst unterschiedliche Bauweisen, Größen und die Existenz von Untergeschossen. Dies ermöglicht eine umfassende Abschätzung der CO₂-Emissionen typischer Hochbauten in Schleswig-Holstein.

Eine Übersicht der untersuchten Gebäude sowie ihrer wesentlichen Bauwerksparemeter und CO₂-Bilanz ist in Tabelle 4 anonymisiert und zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4 Allgemeine Informationen zu den untersuchten Gebäuden

| | | Bue1 | Bue2 | Bue3 | Unt1 | Unt2 | Woh1 | Woh2 | Woh3 | Woh4 |
|--|--------------------------------------|-----------------------------|---|---|-----------------------------|---|---|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Projekt | | bbp: Hornbebauung | bbp: Holtenuau | bbp: Stadtwerke Kiel-Hassee | gmsh: Eutin-108 | gmsh: Vorstudie 2020 | bbp: Waitzstraße | bbp: Martius Haus A | Arge: Typen EnEv2016 | Bonava: Hasloh |
| Geschossanzahl | | 7 | 2 + TG/KG | 3 - 4 + 1/2KG | 4 | 3 + SG | 5 + TG/KG | 3 | 4 + SG + 1/2KG | 2 + SG + KG |
| Fläche Brutto BGF | m ² | 4.259 | 5.920 | 11.097 | 3.236 | 2.328 | 1.955 | 602 | 1.290 | 1.340 |
| Fläche Netto NRF | m ² | 3.700 | 5.150 | 9.587 | 2.912 | 2.095 | 1.760 | 541 | 1.161 | 1.206 |
| Brutto-Rauminhalt BRI | m ³ | 14.610 | 22.115 | 37.260 | 14.513 | 8.165 | 6.133 | 2.171 | 3.735 | 4.049 |
| Gebäudestandard | | k.A. | k.A. | k.A. | EnEV 2016 | EnEV 216 | EnEV 2016 - KfW55 | EnEV - KfW70-2013 | EnEV 2016 | GEG2020 KfW55 |
| Planungszeitraum | | 2020 | 2021 | 2009 | 2016 | 2020 | 2020 | 2013 | 2014-2020 | 2021 |
| Bauweise + Fassade | | Massivbau + Klinker Fassade | Massivbau + WDVS (KG) + Klinker 65% + hinterlüftete Fassade (Alu, Metall) 35% | Massivbau + hinterlüftete Fassade (Alu, Metall) | Massivbau + Klinker Fassade | Massivbau + Klinker 83% + hinterlüftete Fassade (Alu) 17% | Massivbau + Klinker 85% + hinterlüftete Fassade (Alu) 15% | Massivbau + Klinker Fassade | Massivbau + WDVS | Massivbau + Klinker Fassade |
| 100a CO ₂ -Emission (A-D) | kgCO ₂ Aq | 1.792.618 | 4.485.404 | 6.742.855 | 1.345.551 | 1.126.778 | 816.329 | 313.495 | 678.929 | 688.001 |
| CO ₂ -Emission / (Fläche BGF · a) | kgCO ₂ /m ² ·a | 4,21 | 7,58 | 6,08 | 4,16 | 4,84 | 4,18 | 5,21 | 5,26 | 5,13 |
| CO ₂ -Emission / (Fläche NRF · a) | kgCO ₂ /m ² ·a | 4,84 | 8,71 | 7,03 | 4,62 | 5,38 | 4,64 | 5,80 | 5,85 | 5,70 |
| CO ₂ -Emission / (Fläche BRI · a) | kgCO ₂ /m ³ ·a | 1,23 | 2,03 | 1,81 | 0,93 | 1,38 | 1,33 | 1,44 | 1,82 | 1,70 |

4.2 Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen an Massivbauwerken

4.2.1 Vorgehen bei der Auswertung der Ergebnisse

Die Ermittlung der CO₂-Emissionen der betrachtenden Bauwerke basiert auf den in Abschnitt 3 genannten Grundlagen und der dort beschriebenen Vorgehensweise.

Nachdem die absoluten CO₂-Emissionen berechnet wurden, erfolgt eine Umrechnung auf die Nettoraumfläche (NRF) sowie den Bruttorauminhalt (BRI) gemäß DIN 277. Im Folgenden sind die entsprechenden Auswertungen dargestellt:

1. Spannweite der CO₂-Emissionen bezogen auf die Nettoraumfläche und den Bruttorauminhalt in Abschnitt 4.2.2
2. Verteilung der CO₂-Emissionen auf die einzelnen Lebenszyklusphasen, abhängig von der Nutzungsdauer des Bauwerks in Abschnitt 4.2.3
3. Einfluss der Lebensdauer auf die CO₂-Emissionen in Abschnitt 4.2.4

4. Aufteilung der CO₂-Emissionen auf einzelne Bauwerksgruppen (unterhalb der KG 300) in Abschnitt 4.2.5

4.2.2 Spannweite der CO₂-Emissionen

Um einen ersten Eindruck zu gewinnen, in welcher Größenordnung der CO₂-Austoß der Bauwerke liegt, werden in Bild 4.1 die CO₂-Kennwerte für alle Gebäude dargestellt. Diese sind in den Einheiten kgCO₂/m² NRF und kgCO₂/m³ BRI abgetragen, sowohl als Gesamtwerte über eine Nutzungsphase von 100 Jahren als auch als jährliche Durchschnittswerte.

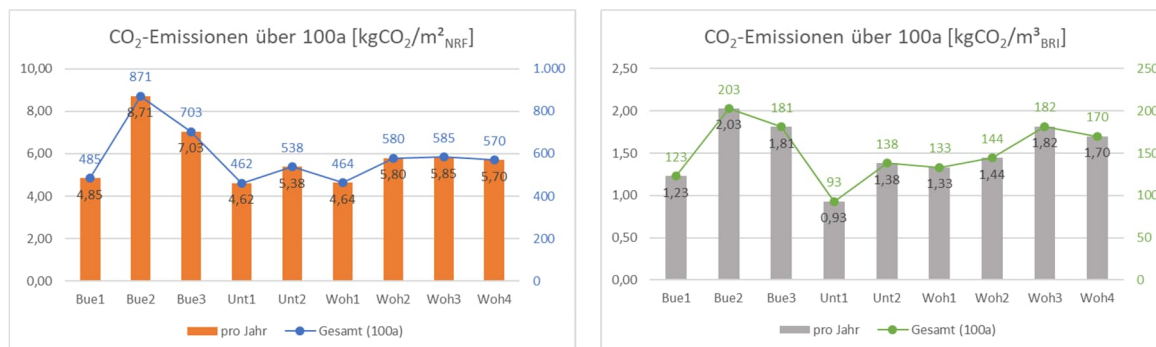


Bild 4.1 CO₂-Emissionen der einzelnen Gebäude in Massivbauweise über die gesamte Lebensdauer von 100 Jahren sowie pro Jahr, bezogen auf die Nettoraumfläche (links) und den Bruttorauminhalt (rechts)

Die CO₂-Emissionen pro m² NRF liegen zwischen 500 kgCO₂ und 700 kgCO₂. Die Werte pro m³ BRI bewegen sich im Bereich von 100 kgCO₂ bis 180 kgCO₂, wobei eine deutliche Streuung erkennbar ist. Bei der Umrechnung auf die jährlichen Emissionen ergeben sich Werte von 5,0–7,0 kgCO₂/m²·a sowie 1,0–1,8 kg CO₂/m³·a. Diese Kennwerte sind in ihrer Größenordnung vergleichbar mit den Ergebnissen früherer Studien aus der Literatur, darunter [4; 14; 28].

Bild 4.2 zeigt die CO₂-Emissionen separat für die einzelnen Lebenszyklusphasen, um eine präzisere Analyse zu ermöglichen. Es wird deutlich, dass die größte CO₂-Emission in der ersten Phase, der Herstellung der Baustoffe (Module A1-A3), anfällt. Der Wert liegt bei etwa 320 kgCO₂/m² NRF bzw. 80 kgCO₂/m³ BRI.

Anschließend folgt die CO₂-Emission während der Betriebsphase (Module B1-B7). Innerhalb des vorgesehenen Nutzungszeitraums von 100 Jahren müssen zahlreiche Baukomponenten wie Türen, Fenster und Fußbodenbeläge, die eine deutlich kürzere Lebensdauer aufweisen, mehrfach modernisiert oder ausgetauscht werden. Diese Maßnahmen führen zu entsprechenden CO₂-Emissionen, die in der Regel dem Modul B4 zugeordnet werden. Der Anteil ist jedoch stark vom Austauschzyklus der jeweiligen Bauelemente abhängig, der sich aus dem Verhältnis der erwarteten Lebensdauer des Bauteils zur Lebensdauer des gesamten Bauwerks ergibt.

Die Emissionen aus der Einbauphase (Module A4-A5) und dem Abbau mit Entsorgung (Module C1-C4) sind im Vergleich deutlich geringer.

Für Gebäude in Massivbauweise zeigt die Recyclingphase (Phase D) nur eine geringe Relevanz auf die Gesamt-CO₂-Emission.

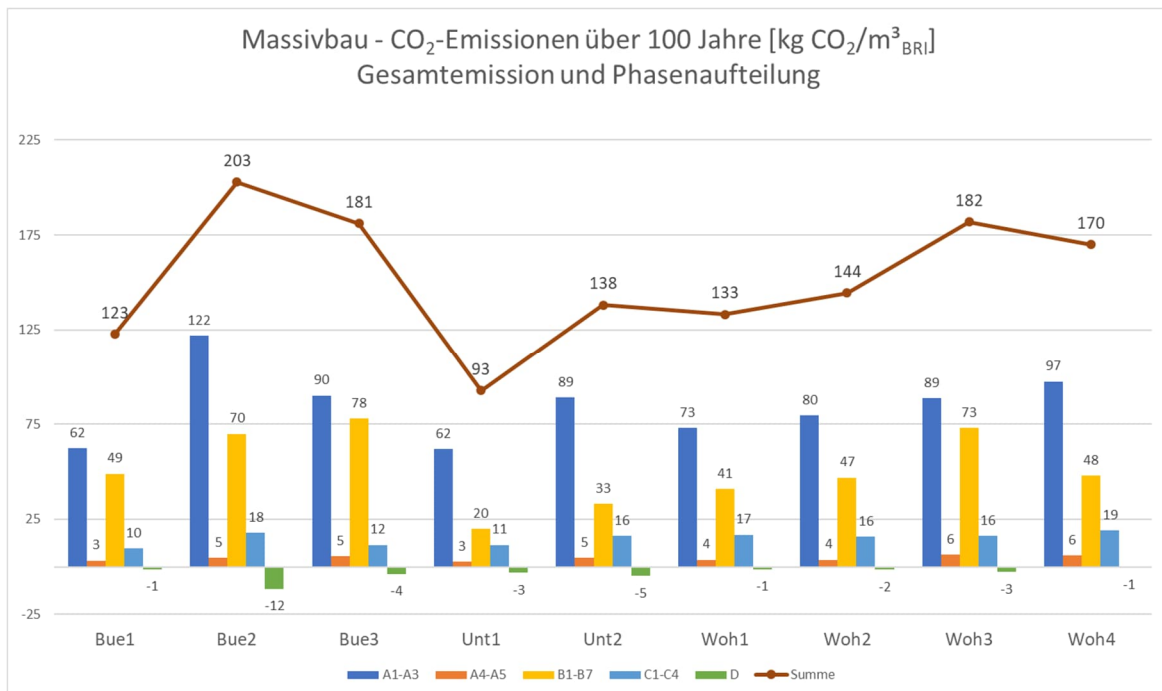
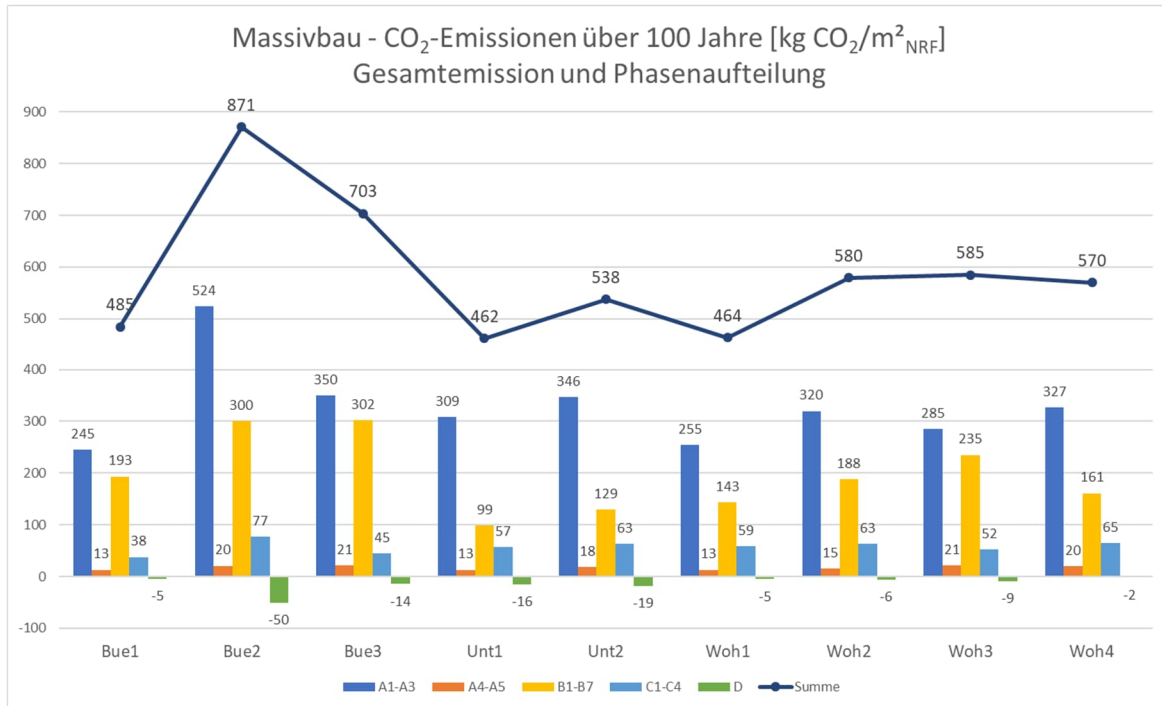


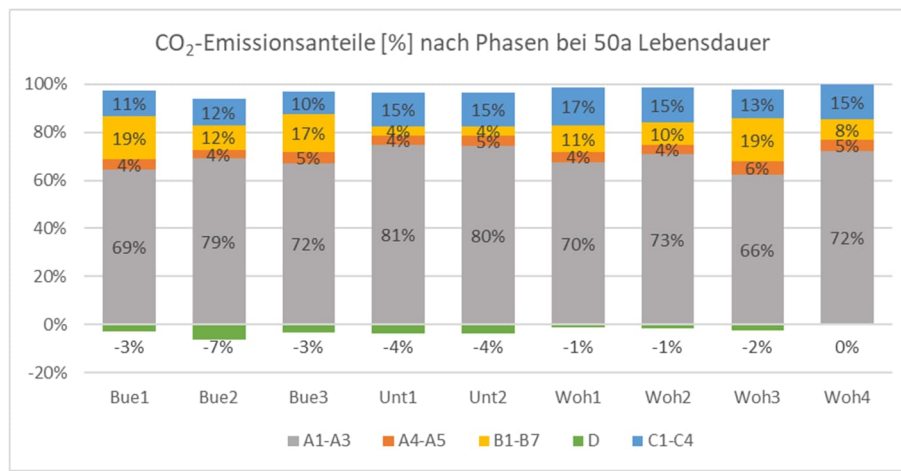
Bild 4.2 CO₂-Emissionen der einzelnen Gebäude in Massivbauweise über 100 Jahre, insgesamt und nach Lebenszyklusphasen, bezogen auf die Nettoraumfläche (oben) und den Brutrauminhalt (unten)

4.2.3 Aufteilung der CO₂-Emissionen auf die einzelnen Phasen A-D in Abhängigkeit der Nutzungsdauer

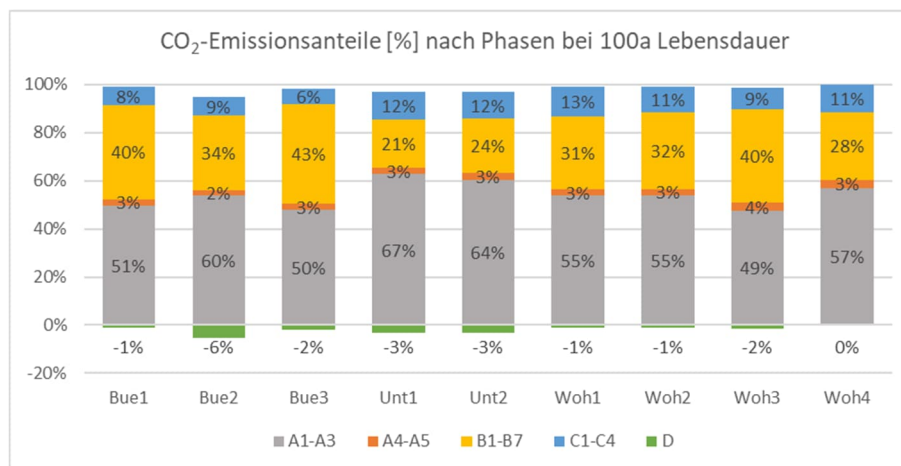
In einem Folgeschritt wurde die Verteilung der CO₂-Emission auf die einzelnen Phasen A-D gemäß Bild 3.1 untersucht. Die Ergebnisse sind jeweils in prozentualer Form in Bild 4.3 dargestellt, wobei die Lebensdauer des Bauwerks hierbei zwischen 50 Jahren (siehe Bild 4.3(a)) und 100 Jahren (Bild 4.3(b)) variiert wurde.

Grundsätzlich bleibt die CO₂-Emission für die Erstellung des Bauwerks (Phase A) konstant und unabhängig von dem Betrachtungszeitraum; da die CO₂-Emission aus der Gebäudenutzung infolge des Austauschs von Bauteilen etc. jedoch mit der Lebensdauer zunimmt, nimmt die prozentuale Relevanz der CO₂-Emission in der Phase A ab. Damit ist die prozentuale Verteilung der CO₂-Emission auf die einzelnen Phasen abhängig von der Lebensdauer. Anhand Bild 4.3 ist ersichtlich, dass bei einer längeren Lebensdauer des Bauwerks der CO₂-Anteil der Herstellung (Phase A) sinkt, während sich der Anteil der Nutzung (Phase B) sich entsprechend erhöht.

(a) Aufteilung der CO₂-Emissionen [%] bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren



(b) Aufteilung der CO₂-Emissionen [%] bei einer Nutzungsdauer von 100 Jahren



(c) Aufteilung der CO₂-Emissionen [%] der durchschnittlichen Werte aller im Vergleich der Nutzungsdauer von 50 Jahren und 100 Jahren

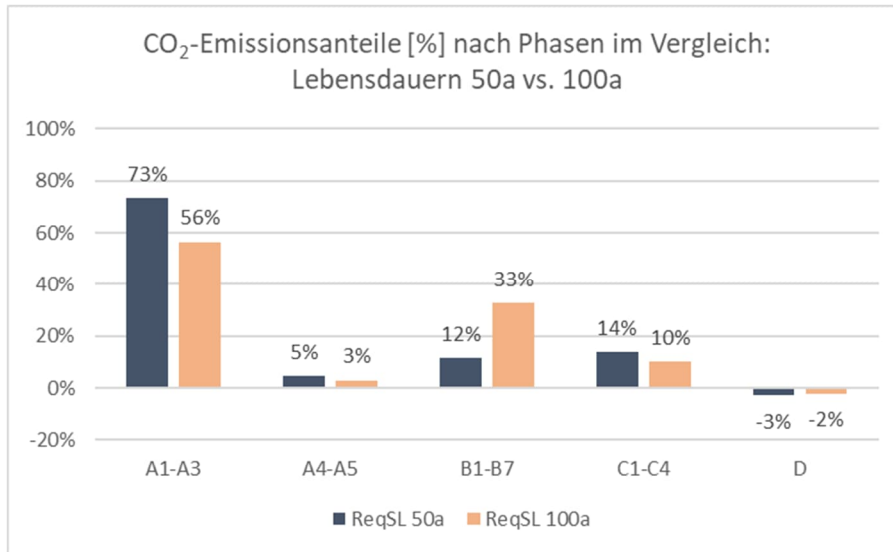


Bild 4.3 Aufteilung der CO₂-Emissionen [%] der einzelnen Gebäude auf die jeweiligen Lebenszyklusphasen bei 50 Jahren (a) und 100 Jahren (b) sowie der durchschnittlichen Werte aller Gebäude (c)

4.2.4 Einfluss der Nutzungsdauer

Bereits die Ergebnisse in Bild 4.3 zeigen, dass die CO₂-Emissionen aus der Nutzungsphase durchaus in der Größenordnung mit den Emissionen aus der Herstellungsphase vergleichbar sein können. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase deutlich unterproportional ansteigen. Während die CO₂-Emissionen in der Phase A (Herstellung und Errichtung) mit etwa 350 kgCO₂/m² innerhalb eines kurzen Zeitraums von ca. 1,5 bis 2 Jahren anfallen (entspricht rund 175 kgCO₂/m² pro Jahr), reduziert sich die Emissionsrate in der Nutzungsphase signifikant auf durchschnittlich etwa 1,65 kgCO₂/m² pro Jahr. Erst in der Abbruchphase treten wieder deutlich steigende CO₂-Emissionengeschwindigkeit auf. Bild 4.4 zeigt dieses exemplarisch für ein typisches Bauwerk mit einer Lebensdauer von 100 Jahren.

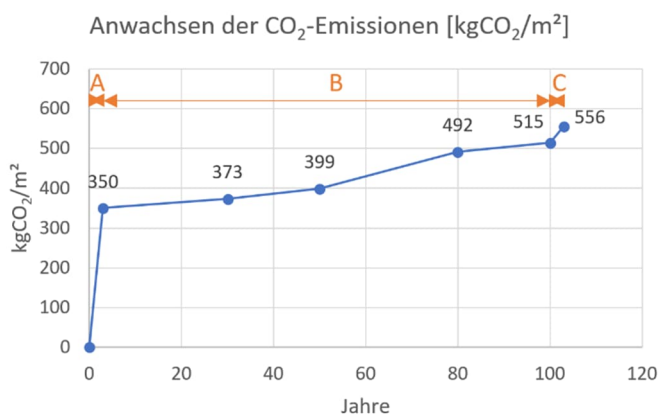


Bild 4.4 Anwachsen der mittleren CO₂-Emissionen über die Zeitachse (A: Herstellungs- und Errichtungsphase, B: Nutzungsphase, C: Abbruchphase) bei einer Lebensdauer von 100 Jahren

Daher ist im Hinblick auf einen geringen CO₂-Ausstoß eine lange Lebensdauer die zu favorisierende Lösung, dieses gilt gleichermaßen für die Tragkonstruktion als auch für die einzelnen Ausbauten. Als Alternative bliebe bei einer kurzen Nutzungsdauer lediglich der Abbruch und Neubau, wodurch in Summe deutlich mehr CO₂ verursacht würde. Daher ist es für eine vergleichende Bewertung sinnvoll, die CO₂-Emissionen auf den Bezugszeitraum zu beziehen und „kg CO₂/m² Nettoräumfläche pro Jahr“ bzw. „kg CO₂/m³ Bruttorauminhalt pro Jahr“ die zielführendere Einheit.

Während bei einer Lebensdauer von ca. 50 Jahren Werte von ca. 8,5 kgCO₂/(m²NRF·a) verbraucht werden, reduziert sich dieses bei einer Lebensdauer von 100 Jahren auf Werte von ca. 6,8 kgCO₂/(m²NRF·a), entspricht um ca. 20 %. Sofern die Tragkonstruktion auch für eine Lebensdauer von 150 Jahren ausgelegt werden kann, würde sich der Wert um 40 % reduzieren. (Bild 4.5)

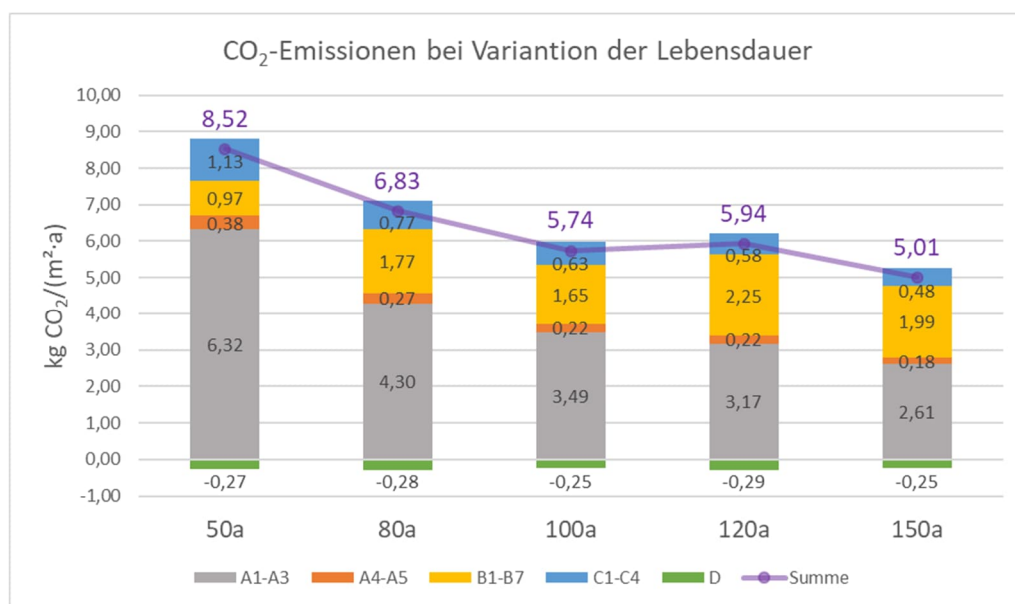


Bild 4.5 Mittlere CO₂-Emissionen in kgCO₂/ (m²·a) bei Variation der Lebensdauer

4.2.5 Aufteilung der CO₂-Emission auf verschiedene Gebäudegruppen und Bauteile der Baukonstruktion (KG 300)

4.2.5.1 Aufteilung der CO₂-Emissionen auf Gebäudegruppen

Um die wesentlichen CO₂-Treiber zu identifizieren, wurde im Folgenden untersucht, wie sich die CO₂-Emission auf die einzelnen Bauteile verteilt. Hierzu wurden die Bauteile gemäß den Erläuterungen in Abschnitt 2 in einem ersten Schritt den in der Praxis gängigen Kostengruppen (KG 310 – KG 360) gemäß DIN 276 zugeordnet. Bei den neun betrachteten Gebäuden ergab sich im Mittel die Aufteilung gemäß Bild 4.6.

Dabei zeigten die Anteile der Kostengruppen eine unterschiedliche Streuung. Im Mittel betrug die Streuung der Werte etwa 35 %. Der Anteil der Erdarbeiten und Gründungen (KG 310 und 320) zeigte mit rund 50 % die größte Spannweite, während die Decken und horizontalen Bauteile (KG 350) mit etwa 20 % die geringste Schwankung aufwiesen.

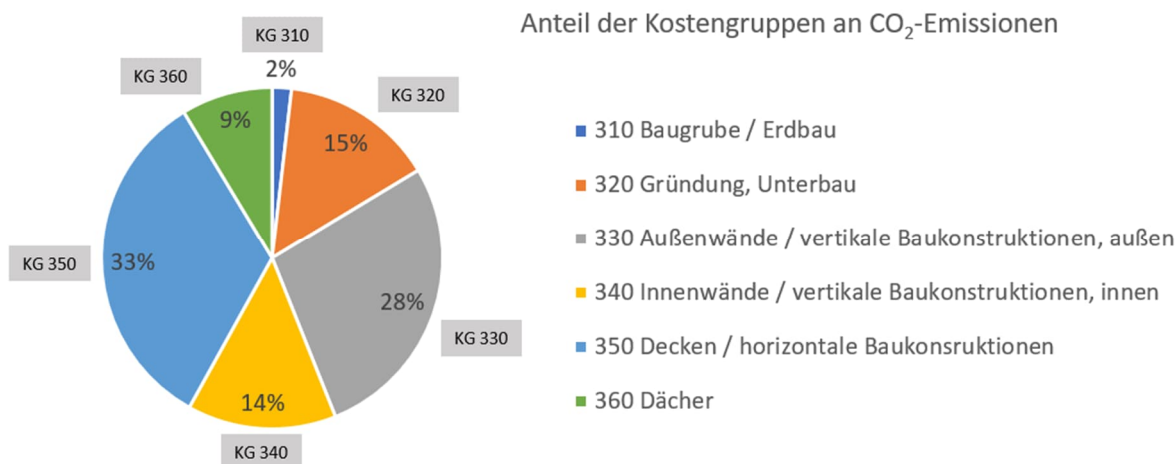


Bild 4.6 Anteil der Kostengruppen an CO₂-Emissionen bei Gebäuden in Massivbauweise

Die Ergebnisse der Auswertung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die CO₂-Emissionen verteilen sich zwar nicht vollkommen gleichmäßig auf die Kostengruppen, aber es lässt sich nicht „der eine“ maßgebende CO₂-Treiber identifizieren. Mit Ausnahme des Erdbaus haben alle Kostengruppen einen entsprechenden Anteil an der Gesamt-CO₂-Emission.
- Den größten Anteil nimmt mit ca. 33 % die Kostengruppe 350 (Decken / horizontale Baukonstruktion) ein. Hier sind bei näherer Analyse vor allem die Rohbaudecke als auch die Fußbodenaufbauten als maßgebende CO₂-Treiber zu nennen.
- Einen annähernd gleich großen Anteil nimmt mit ca. 27 % der vertikale Teil der Baukonstruktion (Kostengruppe 340) ein, hier sind die Rohbau-Außenwände sowie die Dämmung und Fassade die wesentlichen CO₂-Hauptemittenten.
- Tragende und nichttragende Innenwände machen einen geringeren Anteil von etwa 15 % aus. Dies ist auf die Verwendung leichter Materialien für Raumtrennwände ohne wesentliche Aufbauten wie die Dämmung bei den Außenwänden zurückzuführen. Darüber hinaus führt die Verwendung der Skelettbauweise, insbesondere häufig bei Bürogebäuden, dazu, dass offene Bereiche bevorzugt werden, was wiederum den Materialverbrauch für Innenwände im Gebäude reduziert.

In einer weiteren Analyse sind die Bauteile (unabhängig von der Zugehörigkeit der Kostengruppe) nochmal in die folgenden Hauptpositionen bzw. Gewerke unterteilt worden:

- Erdbau
- Rohbau
- Fenster
- Außenhülle
- Innenausbau

In dieser Betrachtungsweise ergeben sich der Rohbau und der Innenausbau mit jeweils ca. 37 % als die für die CO₂-Emissionen maßgeblichen Gewerke (siehe Bild 4.7). Die Anteile verändern sich jedoch mit der betrachteten Lebensdauer des Bauwerks, wie bereits in Abschnitt 4.2.3 erläutert. Bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren reduziert sich der Anteil des Innenausbaus auf ca. 28 %, da in einem kürzeren Zeitraum sowohl weniger Baukomponenten erneuert werden müssen als auch weniger Austauschzyklen erforderlich sind. Gleichzeitig steigt der Anteil des Rohbaus auf etwa 50 % und wird damit zum größten Verursacher der CO₂-Emissionen.

Die Außenhülle und die Fenster weisen einen etwa gleich hohen Anteil von jeweils knapp oberhalb 10 % aus. Hingewiesen sei jedoch, dass – obwohl die Fenster mit ca. 11 % an dieser Stelle nur einen untergeordneten Einfluss auf die „graue Emission“ haben – deren Einfluss auf die CO₂-Emission infolge Gebäudebetrieb von wesentlicher Bedeutung ist. Ebenso sei an dieser Stelle erwähnt, dass die CO₂-Emission eines Quadratmeters Fenster über einen Zeitraum von 100 Jahren etwa doppelt so hoch sind wie die einer Wand mit Dämmschicht und Fassadenverkleidung.

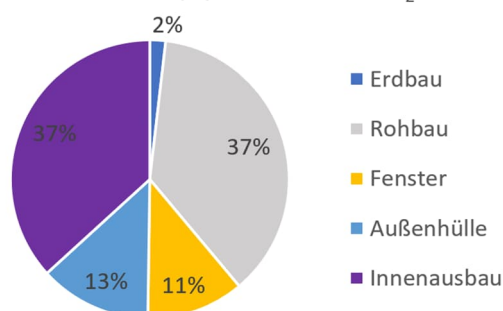
Anteil der Hauptpositionen an CO₂-Emissionen

Bild 4.7 Anteil der Hauptpositionen an CO₂-Emissionen bei Gebäuden in Massivbauweise

Im Folgenden werden die CO₂-Emissionen der beiden maßgebenden Gebäudegruppen, dem Rohbau in Abschnitt 4.2.5.2 und dem Innenausbau in Abschnitt 4.2.5.3 näher untersucht.

4.2.5.2 Analyse der Verteilung der CO₂-Emission innerhalb der Rohbaukonstruktion

Der Rohbau umfasst alle tragenden Bauteile des Gebäudes, sowohl vertikale Bauteile wie Wände und Stützen, als auch horizontale Bauteile wie Fundament, Decken und das Dach.

In Bild 4.8 sind die gesamten CO₂-Emissionen der Rohbaukonstruktion in Massivbauweise, die durch tragende Decken und Wände gekennzeichnet ist, den unterschiedlichen Bauteilen zugeordnet worden.

Dabei zeigt sich eine relativ gleichmäßige Verteilung der Emissionen auf die einzelnen Positionen. Die Deckenkonstruktion nimmt mit 30 % den größten Anteil ein, was vor allem auf das große Bauvolumen zurückzuführen ist. Es folgen die Gründung mit einem Anteil von 23 % und die tragenden Außenwände mit 21 %. Allerdings weist die Gründung eine größere Streuung auf, da die Ausführung stark von der Bauart und den individuellen Bodeneigenschaften abhängt.

Es lässt sich erkennen, dass keine einzelne Position die Gesamtemissionen vollständig dominiert. Die horizontalen (Decken und Dach) und vertikalen tragenden Bauteile (Außen- und Innenwände) machen jeweils ca. 40 % der gesamten CO₂-Emissionen des Rohbaus aus und leisten damit vergleichbare Beiträge.

Anteil der Positionen des Rohbaus an CO₂-Emissionen

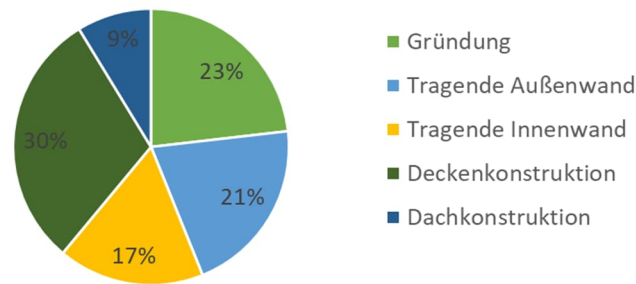


Bild 4.8 Anteil der tragenden Rohbauteile an CO₂-Emissionen bei Gebäuden in Massivbauweise

In einem folgenden Schritt sind die CO₂-Emissionen auf die verwendeten Baustoffe aufgeteilt. Aus dem Bild 4.9 geht hervor, dass sich über 70 % der gesamten CO₂-Emissionen dem bewehrten Beton zuordnen lassen, etwa 20 % entfallen auf Mauerwerk, andere Baustoffe sind von untergeordneter Bedeutung.

CO₂-Emissionsanteile der Baustoffe beim Rohbau

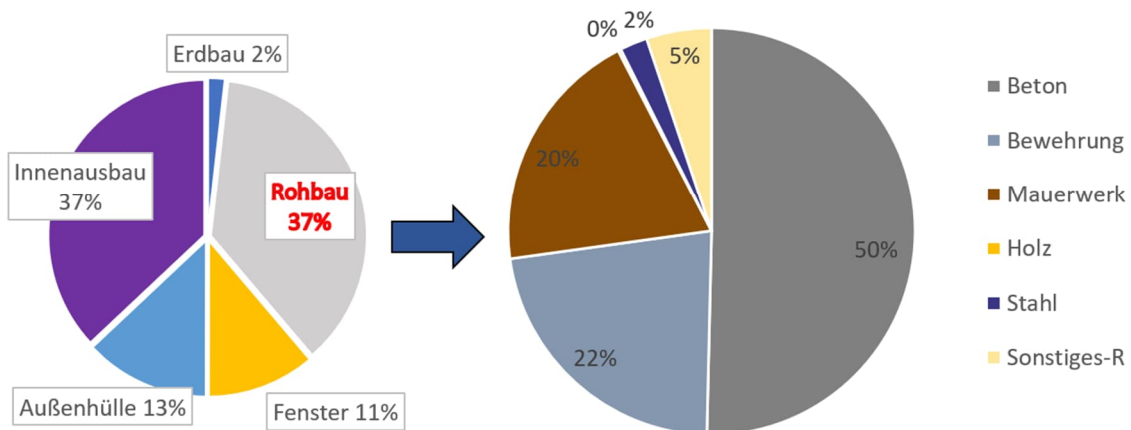


Bild 4.9 CO₂-Emissionsanteil der Baustoffe beim Rohbau massiver Gebäude

Hieraus kann jedoch nicht automatisch die Folgerung gezogen werden, dass bewehrter Beton für die hohen CO₂-Emissionen verantwortlich ist.

Die hohen gesamtheitlichen CO₂-Emissionen von Beton sind vielmehr auch in dem hohen Masseneinsatz begründet, da Beton für viele Bauteile wie Decken, Stützen, aussteifende Kerne etc. ein technisch sinnvoller und zugleich wirtschaftlicher Baustoff ist und im Falle von Gründungen letztlich alternativlos. Im Vergleich dazu fällt der Materialverbrauch anderer Baustoffe im Rohbau deutlich geringer aus. Die CO₂-Emission des Baustoffs Beton an sich ist nicht exorbitant höher als von anderen Baustoffen. So sind in Bild 4.10 die CO₂-Emissionen für einen Kubikmeter pro für verschiedenen Baustoffe gegenübergestellt. Der Wert für einen Beton C25/30 Beton liegt bei ca. 178 kgCO₂/m³, mit Bewehrung etwas bei 240 – 250 kgCO₂/m³ und damit in der gleichen Größenordnung wie Kalksandstein entspricht, dessen Emissionen je nach Herstelleransätzen zwischen 170 und 340 kgCO₂/m³ variieren können.

Im Vergleich dazu liegt der CO₂-Wert von Mauerziegeln deutlich niedriger bei ca. 110 kg CO₂/m³. Allerdings erfordern Mauerziegel im Vergleich zu Stahlbeton oder Kalksandstein dickere Bauteile, um die gleiche Tragfähigkeit zu erreichen.

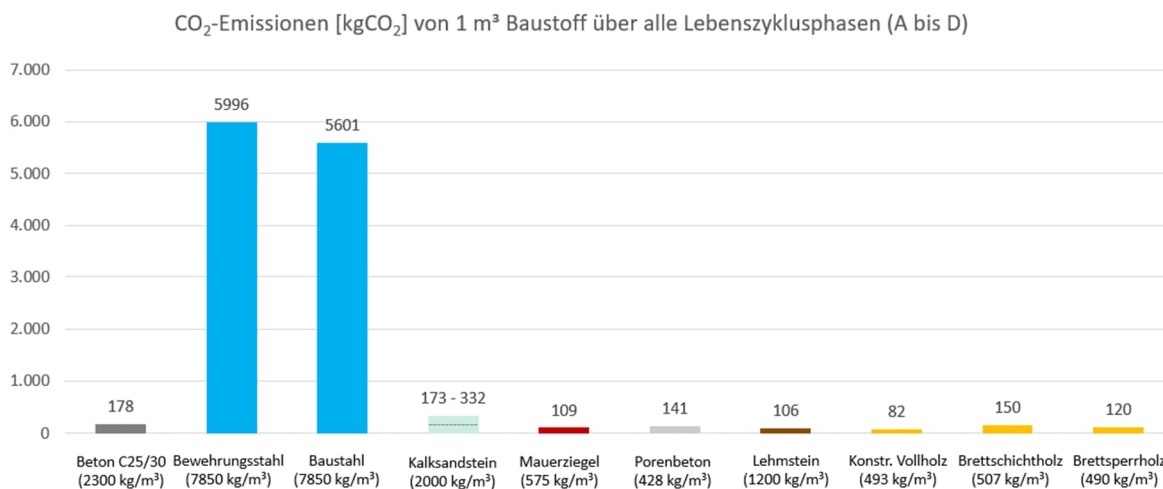


Bild 4.10 CO₂-Emissionen pro m³ gängiger Baustoffe im Hochbau über alle Lebenszyklusphasen (A bis D).

4.2.5.3 Analyse der Verteilung der CO₂-Emission innerhalb des Innenausbaus

Der in Abschnitt 4.2.3.1. festgestellte hohe Anteil der Rohbaukonstruktion an der gesamten CO₂-Emission ist zunächst einmal nicht überraschend und auf die hohen Massen an massiven Baustoffen zurückzuführen, bei denen in der Herstellungsphase sehr viel CO₂ emittiert wird.

Zunächst einmal deutlich unerwarteter ist der hohe Anteil, den der Innenausbau gemäß Bild 4.7 an der gesamten CO₂-Emission hat. Im Gegensatz zu den CO₂-Emissionen aus dem Rohbau ist dieser Anteil allerdings deutlich kleinteiliger und komplexer zu analysieren, da

- eine Vielzahl unterschiedlicher und massenmäßig kleinteiliger Bauteile betroffen sind,
- eine große Spannbreite an unterschiedlichen Materialien zur Anwendung kommt und
- die Lebensdauer der einzelnen Bauteile, die teilweise auch sehr stark differieren kann, eine große Rolle spielt.

So sind hier nichttragende Trockenbauwände, Innentüren, Estrich, Bodenbeläge, Innenputz, Fliesen etc. enthalten. In vielen Fällen scheinen diese von der reinen Menge her belanglos zu sein, gewinnen aber dennoch an Bedeutung, da diese aus teilweise sehr CO₂-intensiven Verarbeitungsprozessen hergestellt werden und ggf. infolge einer geringen Lebensdauer über den Betrachtungszeitraum mehrfach ausgetauscht werden müssen.

Ergänzend spielt auch die Lebensdauer der einzelnen Bauteile eine große Rolle. Während die Lebensdauer der Rohbaukonstruktion, die im Abschnitt 4.2.3 analysiert wurde, im Regelfall der Lebensdauer des Bauwerks entspricht, werden die Bauteile des Innenausbaus in regelmäßigen Abständen ausgetauscht. Dieses ist einerseits auf Verschleiß zurück zu führen, teilweise aber auch, weil Bauteile wie Bodenbeläge oder auch Trockenbauwände, Türen im Zuge von Nutzungsänderungen erneuert werden. Die im Rahmen der Untersuchungen angesetzten Lebensdauer schwanken zwischen 30 Jahren und 50 Jahren für Gipswandbauplatten und Innentüren, so dass diese bei einer 100-jährigen Lebensdauer des Bauwerks zwischen 2-mal und 1-mal ausgetauscht bzw. in der CO₂-Bilanz berücksichtigt werden müssen.

In Bild 4.11 sind die wesentlichen Komponenten der Innenausbauten (ab einem Anteil $\geq 2\%$) dargestellt. Hierbei ist feststellbar, dass die Fußbodenaufbauten und Bodenbeläge den größten Anteil haben, dieses sind in $46\% + 25\%$, also mehr als 70% .

Bei genauerer Untersuchung nimmt der Estrich bei den Fußbodenaufbauten eine zentrale Rolle ein und verursacht rund 75% der CO₂-Emissionen des Gesamfußbodenaufbaus. Hierbei wird im wesentlichen Zementestrich verwendet, der einen CO₂-Einheitswert von $445\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ in der Herstellungsphase des Baustoffs (in der Phase A) bzw. $492\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ in den Phasen A-D aufweist. Bei Einbaustärken von ca. $6 - 6,5\text{ cm}$, so dass die Heizungsrohre einer Fußbodenheizung verlegt werden können, ergeben sich hieraus über alle Phasen A-D CO₂-Wert von ca. $30\text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ Decke. Da die durchschnittliche Lebensdauer von Estrich bei ca. 50 Jahren liegt, muss auch dieser innerhalb der Lebensdauer des Bauwerks zumindest einmal ausgetauscht werden, so dass sich insgesamt ein CO₂-Wert von etwa $60\text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ Decke ergibt.

Der Fußbodenaufbau mit schwimmendem Estrich umfasst im betrachteten System zusätzlich ca. 8 cm Trittschalldämmung und Wärmedämmung aus expandiertem Polystyrol (EPS). Diese Dämmschichten verursachen CO₂-Emissionen von etwa $9\text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ Decke, die sich über 100 Jahren mit einmaliger Erneuerung auf insgesamt $18\text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ summieren. Unter der Annahme, dass die CO₂-Emissionen von bewehrtem Standardbeton (C25/30) mit einem Bewehrungsgrad von 120 kg/m^3 bei etwa $280\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ liegen, kann der 15 cm hohe Fußbodenaufbau mit einem 6 cm starken Zementestrich, hinsichtlich der CO₂-Bilanz einer fiktiven Stahlbetondecke mit einer Dicke von $(60 + 18) / 280 = 28\text{ cm}$ gleichgesetzt werden. Zum Vergleich: Die Dicke von Stahlbetondecken im Wohnungsbau liegt üblicherweise im Bereich 18 bis 24 cm .

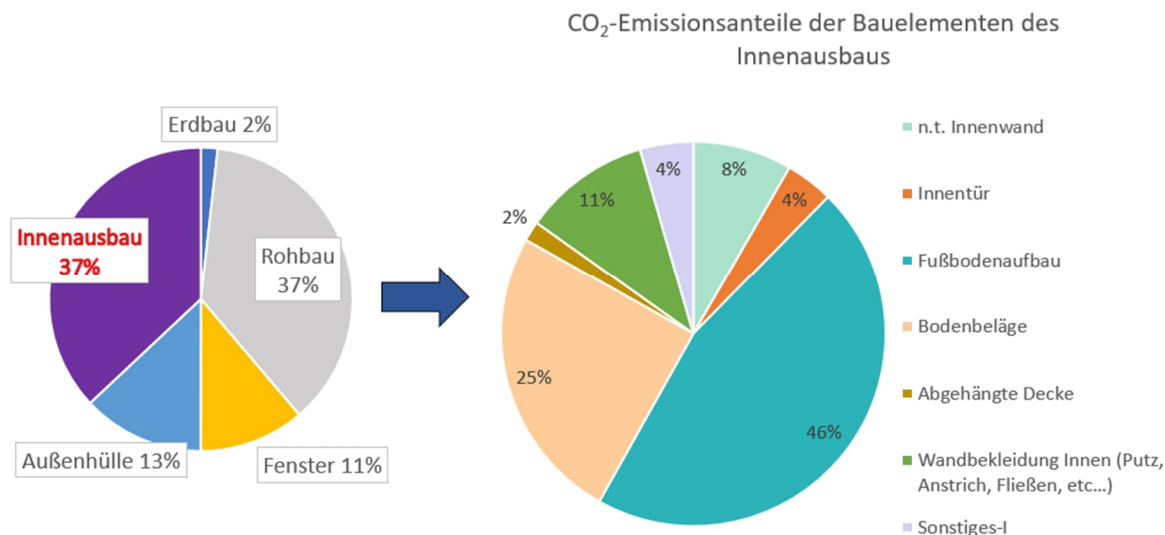
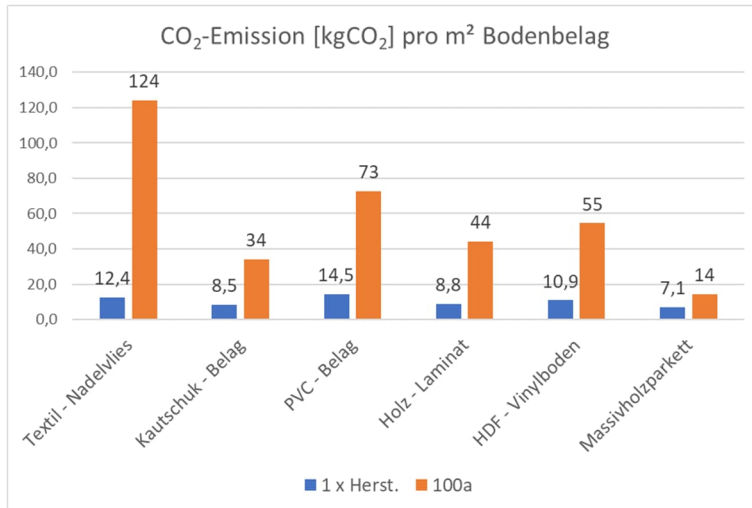


Bild 4.11 Anteil der CO₂-Emission einzelner Bauelemente (ab Einfluss von 2%) an der Gesamtemission des Innenausbaus

Der andere zentrale CO₂-Treiber beim Innenausbau sind die Bodenbeläge. Hierbei ist allerdings zu erwähnen, dass die Auswahlmöglichkeiten (Laminat, Teppich, PVC, Kautschuk, Naturstein etc.) hier sehr groß sind und die Produkte sehr unterschiedliche CO₂-Emissionen und Lebensdauern aufweisen (Bild 4.12), so dass in den im Bild 4.11 angegebenen Mittelwert große Streuungen vorhanden sind.



| 1m ² Bodenbelag | Dicke [cm] | Maße [kg/m ²] | Lebensdauer [Jahre] | CO ₂ -Bilanz 1xHerst. (A-D) [kgCO ₂ /m ²] | CO ₂ -Bilanz 100a (A-D) [kgCO ₂ /m ²] |
|----------------------------|------------|---------------------------|---------------------|---|---|
| Textil - Nadelvlies | - | 1,35 | 10 | 12,4 | 124 |
| Kautschuk - Belag | 0,2 | 3,36 | 30 | 8,5 | 34 |
| PVC - Belag | 0,2 | 3,3 | 20 | 14,5 | 73 |
| Holz - Laminat | 0,9 | 7,5 | 20 | 8,8 | 44 |
| HDF - Vinylboden | 0,9 | 8,7 | 20 | 10,9 | 55 |
| Massivholzparkett | 1,8 | 11,7 | 50 | 7,1 | 14 |

Bild 4.12 CO₂-Emission pro m² typischer Bodenbeläge: Einmalherstellung sowie Angabe über die Lebensdauer

Die Darstellung in Bild 4.12 zeigt, dass der textile Teppich der CO₂-intensivste Bodenbelag ist. Die CO₂-Emission liegt selbst bei Einmalherstellung mit einem Wert von ca. 12,5 kgCO₂/m² etwas höher als die Emission eines Laminat-Holzbodens mit ca. 9 kgCO₂/m² oder eines ca. 2 mm dicken Kautschukbodens mit 8,5 kgCO₂/m². Ergänzend wirkt sich die kurze Lebensdauer des Teppichbodens negativ auf die CO₂-Bilanz aus. Dieses ist einerseits auf dem Verschleiß zurückzuführen aber auch darauf, dass dieser bei einer Umnutzung im Regelfall erneuert wird. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchung wird für der Textile Teppich von einer Lebensdauer von 10 Jahren ausgegangen (siehe Tabelle 3, Abschnitt 3.2.2), so dass dieser bei einer Nutzungsdauer von 100 Jahren insgesamt neunmal ausgetauscht werden müsste, so dass sich über die Lebensdauer eine CO₂-Emission von 10 x 12,5 = 125 kgCO₂/m² ergibt.

Vergleicht man diesen Wert mit einer Standard-Stahlbetondecke, deren Emissionen auf etwa 280 kgCO₂/m³ geschätzt werden, entspricht der Teppichboden hinsichtlich der CO₂-Emission damit einer fiktiven Stahlbetondecke mit einer Stärke von 125/280 = 45 cm. Somit hat ein Teppichboden über die Lebensdauer etwa den doppelten Einfluss auf die Lebensdauer wie eine tragende Stahlbetondecke.

Die Ergebnisse sind in Bild 4.13 nochmals visualisiert: Links ist zunächst der Aufbau einer typischen 25 cm starken Stahlbetondecke mit 6 cm schwimmenden Zementestrich auf insgesamt ca. 8 cm dicken Dämmplatten und Teppichboden dargestellt. In der Mitte bzw. rechts wird der Einfluss auf die CO₂-Bilanz gezeigt, wobei alle Komponenten CO₂-mäßig auf eine „fiktive“ Stahlbetondecke umgerechnet wurden, einmal für die Einmalherstellung (Bild 4.13 Mitte) und dann die Gesamt-CO₂-Bilanz über die Lebensdauer (Bild 4.13 rechts). Hierbei eben der überraschende Einfluss, dass die Aufbauten über die Lebensdauer die CO₂-Emissionen der Stahlbetondecke tatsächlich vielfach überwiegen.

Bei anderen Fußbodenbelägen ist der Einfluss auf die CO₂-Bilanz weniger ausgeprägt. Kautschuk, Laminat und HDF-Vinylboden weisen mit ca. 10 kg CO₂/m² für die Einmalherstellung und einer Nutzungsdauer von 20-30 Jahren einen ähnlichen CO₂-Wert auf. Über einen Zeitraum von 100 Jahren ergibt sich für diese Varianten eine CO₂-Emission von rund 45 kgCO₂/m², was etwa 65 % der CO₂-Emissionen einer Stahlbetondecke im Rohbau entspricht. Massivholzparkett zeichnet sich durch einen niedrigen CO₂-Wert von 7 kgCO₂/m² bei der einmaligen Herstellung und einer langen Lebensdauer von 50 Jahren aus und stellt hinsichtlich CO₂-Bilanz die beste Option dar. (Bild 4.12)

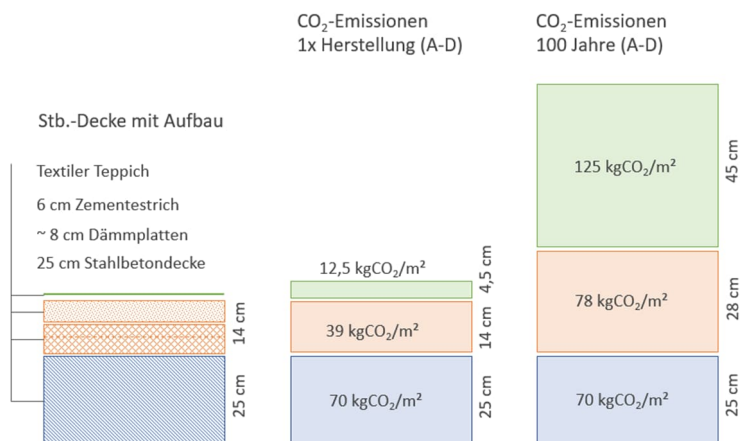


Bild 4.13 Einfluss der einzelnen Komponenten einer typischen Stahlbetondecke inklusive des Aufbaus auf die CO₂-Emissionen

4.2.6 Aufteilung der CO₂-Emission auf verschiedene Komponenten bzw. Baustoffe

Um zusätzlich – über alle Gewerke hinweg – einen Überblick zu bekommen, was die wesentlichen CO₂-Treiber sind, ist der Einfluss aller Haupt-Komponenten auf die CO₂-Bilanz dargestellt (Bild 4.14).

Hierbei ergeben sich zusammenfassend folgende Ergebnisse:

- Gemäß der Darstellung in Bild 4.14 haben die Betonarbeiten einen sehr hohen Einfluss auf die CO₂-Emission des gesamten Gebäudes. Unter Berücksichtigung der Bewehrung sind dieses ca. 18 % + 8 % = 26 %.
- Wie die Untersuchungen in Abschnitt 4.2.5.3 zeigen, haben die Fußbodenaufbauten inklusive der Bodenbeläge einen ähnlich hohen Einfluss auf die CO₂-Emission. In Summe ergeben sich hier unter Berücksichtigung der abgehängten Decke sogar 27 %.
- Weitere wichtige Komponenten für die CO₂-Bilanz sind die Außenhülle des Gebäudes, die die Außendämmung, Fassade sowie Dachbekleidung umfasst, mit einem gesamten Anteil von 6 % + 7 % = 13 %.
- Mauerwerkswände (außen- und innen), tragen mit 8 % weniger zur CO₂-Bilanz bei als Fenster, die mit 11 % einen höheren Anteil ausmachen, trotz ihres i. d. R. geringeren Flächenanteils. Fenster mit Dreifachverglasung verursachen ca. 100 kgCO₂/m² bei 30 Jahren Nutzungsdauer, während Mauerwerk-Außenwände über 100 Jahre nur etwa 50 kgCO₂/m² aufweisen. (Eine detaillierte Analyse siehe Abschnitt 5.6).
- Die verbleibenden Komponenten wie Innenwände, Türen etc. sind dann von eher untergeordneter Bedeutung.

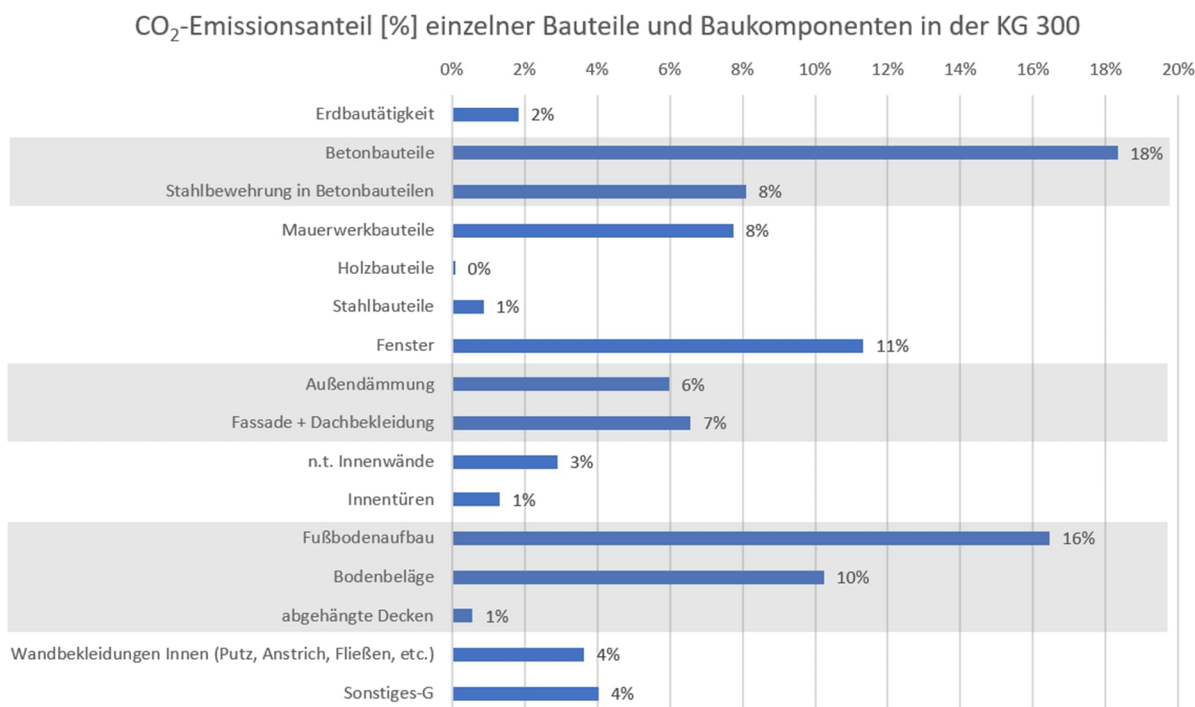


Bild 4.14 Anteil [%] der einzelnen Bauteile bzw. Baukomponenten auf die CO₂-Bilanz

4.3 Zusammenfassung der CO₂-Untersuchungen an aktuellen Neubauten

Die Ergebnisse der durchgeführten CO₂-Berechnungen an Hochbauten ist im Folgenden nochmal zusammengefasst:

- Bei üblichen, in Massivbauweise errichteten Hochbauten werden hinsichtlich der grauen Emission etwa 500 – 700 kgCO₂/m² NRF bzw. 100 – 180 kgCO₂/m³ BRI für die Gebäudekonstruktion (KG 300) emittiert. Würden graue Emission der technischen Anlagen mitberücksichtigt werden, würden die Werte auf ca. 600 – 900 kgCO₂/m² NRF bzw. ca. 120 – 220 kgCO₂/m³ BRI anwachsen.
- Umgerechnet auf eine Nutzungsdauer des Bauwerks von 100 Jahren sind dieses 5,0 – 7,0 kgCO₂/(m²_{NRF}·a) bzw. 1,0 – 1,8 kgCO₂/(m³_{BRI}·a) für die Gebäudekonstruktion bzw. auf Werte zwischen 6,0 – 9,0 kgCO₂/(m²_{NRF}·a) bzw. 1,2 – 2,2 kgCO₂/(m³_{BRI}·a), wenn ergänzend die technischen Anlagen mit berücksichtigt werden.
- Der wesentliche Anteil der CO₂-Emission fällt in der Phase A (Herstellung und Errichtung, Module A1 bis A5) an, wobei der zentrale CO₂-Treiber die Produktion der Baustoffe und Bauelemente ist. Im Mittel werden alleine für die Gebäudekonstruktion in der Phase A etwa 350 kgCO₂/m² NRF bzw. 90 kgCO₂/m³ BRI emittiert. Unter Berücksichtigung der technischen Anlagen (TGA) erhöht sich dieser Wert nochmals um 20 – 30 % auf 430 kgCO₂/m² NRF bzw. 110 kgCO₂/m³ BRI.
- Die ermittelten Werte liegen etwa 3-fach höher, als der von [1] ermittelte Maximalwert von 32 kgCO₂/m³ BRI, der zur Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaabkommens nicht überschritten werden darf.
- Aufgrund der Vielzahl der Bauteile gibt es nicht „den Einen“ Haupt-CO₂-Treiber, mit entsprechendem Abstand sind die folgenden Bauteile jedoch für die größte CO₂-Emission verantwortlich:

-
- Die Rohbaudecken (ca. 30 % der CO₂-Emission des Rohbaus);
 - Die Fußbodenaufbauten inklusive Bodenbeläge; bei der Ersterstellung in der Bauphase A sind dieses zwar lediglich ca. 15 % der gesamten CO₂-Emission der Baukonstruktion; über die gesamte Lebensdauer wächst der Wert jedoch auf etwa 26 % an.

Auch über alle Positionen hinweg sind die Gesamt-CO₂-Emissionen aus dem Rohbau und dem Innenausbau etwa in gleicher Größenordnung. In der Bauphase A überwiegt der Rohbau mit ca. 60 %, der Innenausbau liegt hier bei ca. 23 %, wächst jedoch über die Lebensdauer auf 37 % an.

Neben den o.g. globalen CO₂-Werten auf Bauwerksebene sind im Folgenden auch Anhaltswerte für CO₂-Berechnungen auf Bauteilebene (wie z.B. Decken, Wände) zusammengestellt. Mithilfe der Werte kann anhand der Flächen für Wände, Decken die CO₂-Emission des Gebäudes abgeschätzt werden.

Tabelle 5 Konzeptvorstellung für den Bauteilkatalog

| CO ₂ -Emission-Wert über alle Lebenszyklusphasen pro m ² Bauteil | | | | | | | |
|--|--------------------|------------------------------|------|----------------|--------------------|--|---|
| Bauteil | Bauteilkomponente | Material | Maße | Einheit | Lebensdauer [Jahr] | CO ₂ -Emission 1xHerstellung [kgCO ₂] | CO ₂ -Emission über 100 Jahre [kgCO ₂] |
| Gründung | Bodenplatte | Bodenersatz (Kies, Schotter) | 1 | to | 100 | 20 | 20 |
| | | Bitumen-Schweißbahn | - | m ² | 100 | 6 | 6 |
| | | Sauberkeitschicht (C16/20) | 10 | cm | 100 | 15 | 15 |
| | | Perimeterdämmung XPS | 12 | cm | 100 | 20 | 20 |
| | | Stahlbeton (C30/37) | 40 | cm | 100 | 110 | 110 |
| | Bodenaufbauten | Gussasphaltestrich (2400) | 6 | cm | 25 | 30 | 120 |
| | Bodenbelag | QS8 - Epoxidharz (1200) | 0,2 | cm | 10 | 30 | 300 |
| Betonpflasterstein | | 8 | cm | 50 | 26 | 52 | |
| Außenwand | Tragende Wand | Kalksandstein (2000) | 17,5 | cm | 100 | 30-60 | 30-60 |
| | | Hochlochziegel m. MW-füllung | 36,5 | cm | 100 | 55 | 55 |
| | | Stahlbeton (C25/30) | 20 | cm | 100 | 50 | 50 |
| | Innenbekleidung | Kalkgipsputz | 1,5 | cm | 100 | 3,5 | 3,5 |
| | Wärmedämmung | XPS | 18 | cm | 50 | 31 | 62 |
| | | EPS | 18 | cm | 50 | 21,5 | 43 |
| | | Mineralwolle | 18 | cm | 50 | 25 | 50 |
| | | Holzfaserdämmplatte | 18 | cm | 50 | 17 | 34 |
| | Fassadebekleidung | Armierungsmörtel | 1 | cm | - | 8 | - |
| | | Kunstharpuz | 1 | cm | 40 | 12 | 36 |
| | | Dispersionsfarbe | 0,03 | cm | 10 | 0,7 | 7 |
| | | Riemchen | 1,4 | cm | 50 | 7,5 | 15 |
| | | Klinker - Vormauerziegel | 11,5 | cm | 100 | 35 | 35 |
| Holzverschalung | | 2 | cm | 50 | 4 | 8 | |
| Aluminium - Paneel | | 0,1 | cm | 50 | 10 | 20 | |
| Fenster | 3f. Verglasung | PVC Rahmen | - | | 30 | 100 | 300 |
| | | Holz Rahmen | - | | 30 | 50 | 150 |
| Innenwand | Tragende Innenwand | Kalksandstein (2000) | 24 | cm | 100 | 40-80 | 40-80 |
| | | Stahlbeton (C25/30) | 18 | cm | 100 | 45 | 45 |
| | n.t. Innenwand | Kalksandstein (2000) | 11,5 | cm | 100 | 20-40 | 20-40 |
| | | Metallständer-GK-Platte | 10 | cm | 50 | 10 | 20 |
| | | Holzständer-GK-Platte | 12,5 | cm | 100 | 10 | 10 |
| | | Gipswandbauplatte | 10 | cm | 100 | 24 | 24 |

 * bei geänderter Dicke kann CO₂-Wert linear umgerechnet werden.

| CO ₂ -Emission-Wert über alle Lebenszyklusphasen pro m ² Bauteil | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------|--------------------|--|---|------|-----|
| Bauteil | Bauteilkomponente | Material | Maße | Einheit | Lebensdauer [Jahr] | CO ₂ -Emission 1xHerstellung [kgCO ₂] | CO ₂ -Emission über 100 Jahre [kgCO ₂] | | |
| Decke | Tragende Deckenplatte | Stahlbeton (C25/30) | 22 | cm | 100 | 55 | 55 | | |
| | | HBV-Decke | 26-34 | cm | 100 | 45 | 45 | | |
| | Bodenaufbauten | Massivholz Brettspertholz | | 20 | cm | 100 | 25 | 25 | |
| | | | Trittschalldämmplatte | 3 | cm | 50 | 3,5 | 7 | |
| | | Zementestrich (2400) | 6 | cm | 50 | 25 | 50 | | |
| | | Calciumsulfat-Estrich (2000) | 6 | cm | 50 | 15 | 30 | | |
| | | Trockenestrich m. Schüttung | 7 | cm | 50 | 14 | 28 | | |
| | | Hohlbodensystem (P = 3kN) | 17,5 | cm | 50 | 39 | 78 | | |
| | | Bodenbelag | textiler Teppich | - | | m ² | 10 | 12,5 | 125 |
| | | | Kautschuk | 0,2 | cm | 30 | 8,5 | 34 | |
| | | | PVC-Belag | 0,2 | cm | 20 | 14,5 | 73 | |
| | | | Holz-Laminat | 0,9 | cm | 20 | 9 | 45 | |
| | Deckenbekleidung | Massivholzparkett | 1,8 | cm | 50 | 7 | 14 | | |
| | | GK abgehangen m. Montage | 1,25 | cm | 100 | 6 | 6 | | |
| | | Metalldeckensystem (Stahl) | - | | 100 | 9 | 9 | | |
| Dach | Flachdach - Warmdach | Stahlbetonplatte (C25/30) | 20 | cm | 100 | 50 | 50 | | |
| | | Wärmedämmung (EPS) | 22 | cm | 40 | 26 | 78 | | |
| | | Bekiesung m. Bitumenabdichtung | 5-8 | cm | 40 | 8,5 | 25,5 | | |
| | Flachdach - Gründach | Stahlbetonplatte (C25/30) | 22 | cm | 100 | 55 | 55 | | |
| | | Folie für Gründach | - | | 50 | 8 | 16 | | |
| | | Gründach (~ 10 cm Obersubstrat) | 13 | cm | 50 | 36 | 72 | | |
| | Holz - Satteldach | Nadelholzsparren (Anteil 20%) | 22 | cm | 100 | 2,5 | 2,5 | | |
| | | MiWo Dämmung (Anteil 80%) | 18 | cm | 100 | 8,5 | 8,5 | | |
| | | Dampfbremse PE (5 Lagen) | 0,02 | cm | 40 | 3,5 | 10,5 | | |
| | | Dachbahnen ECB | - | | 50 | 12 | 24 | | |
| | | Dacheindeckung (Stein, Ziegel) | - | | 100 | 8 | 8 | | |
| | | GFK - Verkleidung innen | 1,25 | cm | 100 | 2 | 2 | | |

* bei geänderter Dicke kann CO₂-Wert linear umgerechnet werden.

Im folgenden Kapitel werden Ansätze untersucht, die CO₂-Emission entsprechend zu reduzieren.

5 Untersuchungen von Optimierungen zur Reduzierung der grauen Emission

5.1 Allgemeines

Im Folgenden werden Ansätze untersucht, die im Abschnitt 4 für typische Hochbauwerke ermittelten CO₂-Emission zu reduzieren.

Hierbei wird in einem ersten Schritt in Abschnitt 5.2 geprüft, ob alleine eine regenerative Stromerzeugung die CO₂-Emissionen signifikant reduzieren kann und hierdurch der Grenzwert von 32 kgCO₂/m³ BRI, der nach [1] zur Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaabkommens eigentlich einzuhalten wäre, erreicht werden kann.

In einem zweiten Schritt wird dann in Abschnitt 5.3 analysiert, wie sich eine längere Nutzungsdauer auf die CO₂-Emission auswirkt.

Anschließend wird der Fokus auf der Optimierung folgender emissionsrelevanter Bauteile gelegt:

1. Gebäude in Holzbauweise (Abschnitt 5.4)
Es wird geprüft, inwieweit die CO₂-Emission reduziert werden kann, wenn statt der Massivbauweise vornehmlich der Baustoff Holz verwendet wird. Besonders in der Bauphase A, wo der Rohbau kurzfristig große Mengen CO₂ verursacht, erscheint eine Reduktion besonders wirkungsvoll.
2. Optimierung der Deckensystemen (Abschnitt 5.5)
Da Deckensysteme (KG 350) mit 33 % der Gesamt-CO₂-Emissionen die Bauteilgruppe mit dem größten Einfluss auf die CO₂-Bilanz sind, wird hierzu neben der vorgenannten Untersuchung ergänzend eine separate Betrachtung durchgeführt.
3. Optimierung der Außenwandsysteme (Abschnitt 5.6)
Die Außenwände (KG 330) tragen etwa 28 % zur Gesamt-CO₂-Emission bei und stellen damit den zweigrößten Anteil dar. Daher ist eine detaillierte Analyse möglicher Optimierungsmaßnahmen von großer Bedeutung.
4. Optimierung der Fußbodenaufbauten und Bodenbeläge (Abschnitt 5.7 und 5.8)
Da die Fußbodenaufbauten und Bodenbeläge mit 26 % der CO₂-Emissionen der Bauwerkskonstruktion über die Lebensdauer den zweitgrößten Einfluss haben, werden hierzu ebenfalls Betrachtungen durchgeführt, diese Emissionen zu reduzieren.
5. Untersuchung verschiedener Dämmstoffe (Abschnitt 5.9)
Auch Außendämmung haben mit 6 % einen relevanten Anteil an der Gesamt-CO₂-Bilanz und werden hinsichtlich möglicher Einsparpotentiale betrachtet.

Die Ergebnisse aller Optimierungsmaßnahmen werden abschließend in Abschnitt 5.10 zusammengeführt und hieran abgeschätzt, inwieweit die Gesamt-CO₂-Emission hiermit reduziert werden kann.

5.2 Untersuchung des Einflusses der „Energiewende“ auf die ermittelten CO₂-Emissionen

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung soll abgeschätzt werden, wie sich die vorgesehene „Energiewende“, hin zur regenerativen Energieerzeugung auf die ermittelten CO₂-Emissionen auswirkt.

Grundsätzlich sind alle Prozesse – und damit auch die CO₂-Emissionen – bei der Herstellung der Baustoffe, dem Bauprozess oder aber auch bei jeglichen Tätigkeiten im Zuge von späteren Instandsetzungen, Umbauten oder dem Rückbau von Bauwerken von (elektrischer) Energie abhängig. Mitunter besteht sogar die Meinung, dass der vorgesehene Umbau der Energieerzeugung von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern im gleichen Maße eine Reduzierung der „grauen Emission“ nach sich zieht und sich die hohen CO₂-Emissionen bei der Erstellung von Bauwerken daher automatisch regulieren würden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass sich der CO₂-Ausstoß bei der Herstellung der Baustoffe aus drei Anteilen zusammensetzt (Bild 5.1):

- chemischer Anteil,
- elektrischer Anteil aus dem erforderlichen Strombedarf,
- thermischer Anteil, durch erforderliche Verbrennungsprozesse, um die für den Herstellungsprozess der Baustoffe erforderlichen Temperaturen zu erzeugen.

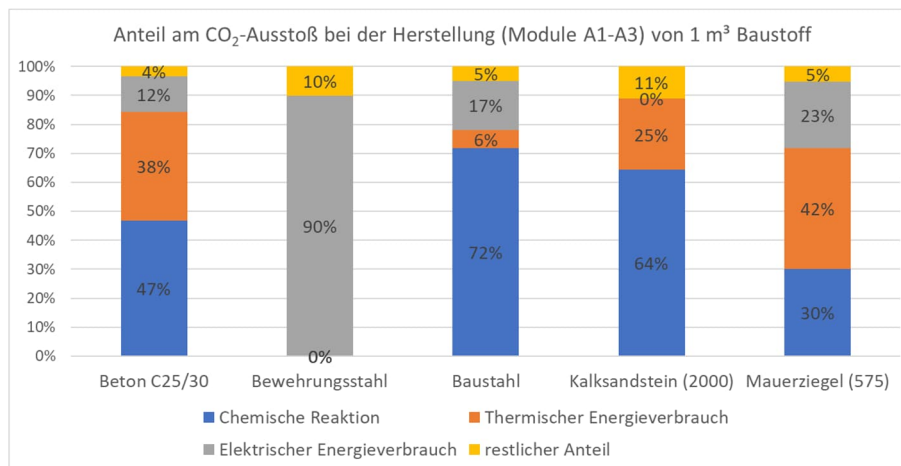


Bild 5.1 Chemischer, elektrischer und thermischer Anteil am CO₂-Ausstoß bei der Herstellung eines Kubikmeters der jeweiligen Baustoffe

Hierbei ist allerdings lediglich der elektrische Anteil direkt an den vorgesehenen Energieträgerumbau gekoppelt, der chemische Anteil ist hiervon völlig unabhängig und – unter Aufrechterhaltung der bestehenden Verfahrenstechnik – der thermische Anteil ebenfalls weitestgehend. Auch der Ersatz von fossilen Energieträgern, durch nachwachsende Rohstoffe, führt bei der Verbrennung lediglich zu einem untergeordneten positiven Effekt, weil in der Geschwindigkeit, in der das gebundene CO₂ bei der Verbrennung aus dem nachwachsenden Energieträger entweicht, kein neuer Energieträger nachwachsen bzw. CO₂ gebunden werden kann.

Im Folgenden wurde eine Abschätzung vorgenommen, in welcher Größenordnung ein positiver Einfluss der angestrebten „Energiewende“ auf die Reduzierung der „grauen Energie“ erwartet werden kann. Hierzu wurden verschiedene Prognosen von [29–32] ausgewertet, um zu ermitteln, wie sich der CO₂-Ausstoß für eine Kilowattstunde Strom zukünftig reduziert (Bild 5.2 links). Demzufolge könnten sich die CO₂-Emissionen von aktuell ca. 420 g je kWh Strom

mittelfristig auf Werte zwischen 25 und 50 g reduzieren, wenn der Strom verbrennungsunabhängig und aus erneuerbaren Energien gewonnen würde. Auch wenn diese Prognose im Rückblick auf die bislang erzielten Erfolge eher optimistisch scheint, wird im Folgenden dennoch eine Untersuchung durchgeführt, um wieviel sich die „graue Emission“ reduzieren würde, wenn für die Erzeugung einer kWh Strom lediglich 25 gCO₂ emittiert würden.

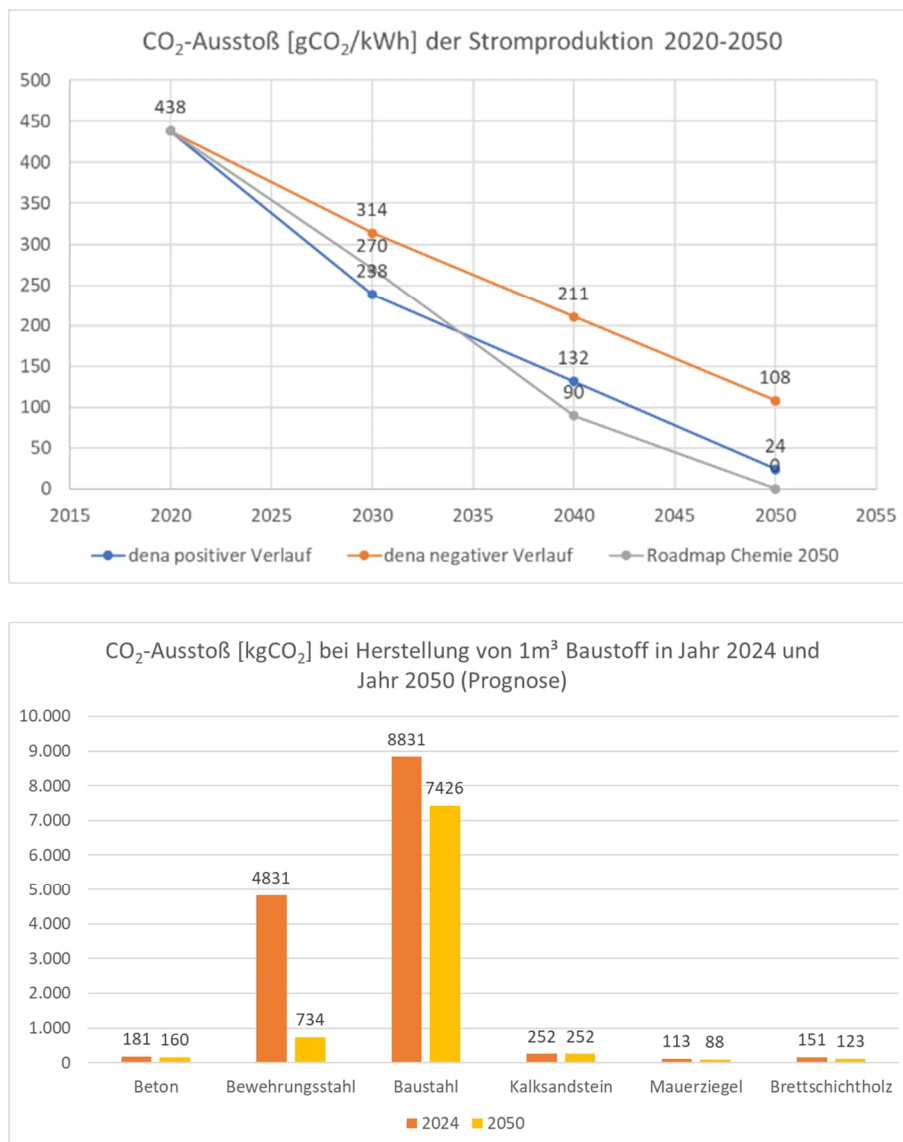


Bild 5.2 Betrachtung der Veränderung des Strommixes in Deutschland
 Oben: Prognose Veränderung CO₂-Emissionen pro kWh Strommix bis 2050;
 Unten: CO₂-Emission /m³ Baustoff für die Herstellung unter Berücksichtigung der „Energie-wende“ mit einem CO₂-Ausstoß von lediglich 25 gCO₂/kWh Strom

Die Ergebnisse in Bild 5.2 zeigen, dass der Energieumbau und die Reduktion der „grauen Emission“ im Vergleich zur Ausgangssituation im Jahr 2024 insbesondere bei den wesentlichen mineralischen Baustoffen, die für die Konstruktion eines Bauwerks verwendet werden, nur geringe Auswirkungen auf die Erstellung des Rohbaus haben. Die CO₂-Emissionen würden sich hierbei im Durchschnitt um etwa 15 % verringern.

Dieses ist in dem geringen Anteil des elektrisch bedingten CO₂ an den Gesamt-CO₂-Emissionen bei der Herstellung der mineralischen Baustoffe wie Beton begründet. Dieses am Beispiel der Herstellung eines Betons C25/30 erläutert: Für die Herstellung eines Kubikmeters Beton (C25/30) sind im Durchschnitt 181 kgCO₂ erforderlich. Davon sind ca. 85 kgCO₂ auf chemische Prozesse zurückzuführen, die bei der Umwandlung von Kalkstein zu Zementklinker im Zementherstellungsprozess unvermeidbar anfallen. Weitere 68 kgCO₂ fallen durch erforderliche Verbrennungsprozesse des Zements an und lediglich 22 kgCO₂ sind abhängig von elektrischer Energie. Die restlichen 6 kgCO₂ entstehen bei der Bereitstellung und Aufbereitung der Gesteinskörnungen, Zusatzstoffe usw. sowie dem Transport zum Werk. Daher reduzieren sich die CO₂-Emissionen – unter Beibehaltung der bisherigen Verfahrenstechnologie – selbst bei fast 100% regenerativer Energieerzeugung lediglich um ca. 10% auf ca. 160 kgCO₂/m³ (Bild 5.2 unten).

Bei metallischen Baustoffen wie Bewehrungsstahl und Baustahl, die fast zu 100% aus Recyclingschrott gewonnen werden, hat die Stromerzeugung einen entscheidenden Einfluss auf die CO₂-Emission. Dabei entfällt etwa 90 % der CO₂-Emissionen bei der Herstellung auf den elektrischen Anteil (Bild 5.1). Die Produktion erfolgt ausschließlich durch das Elektrostaahlverfahren, welches lediglich elektrische Energie in Form von Strom verbraucht. Unter der Annahme des CO₂-Emissionsfaktors 2050 von 25 gCO₂/kWh ließe sich der CO₂-Ausstoß bei der Herstellung von Stahlbewehrung und Baustahl aus 100% Recyclingschrott um circa 70 % reduzieren (Bild 5.2 unten).

Im Gegensatz dazu weist Baustahl, der aus Eisenerz im Hochofenprozess hergestellt wird, ein deutlich geringeres Einsparungspotential durch den Einsatz von grünem Strom auf. Da der chemische Anteil an den CO₂-Emissionen bei etwa 70 % und der elektrische Anteil nur bei rund 20 % liegt (Bild 5.1), ist die Reduzierung der CO₂-Emissionen auf weniger als 10 % begrenzt (Bild 5.2 unten).

Bei einer groben Abschätzung ergibt sich für den Rohbau eine Reduzierung von etwa 15 %, während bei den Fenstern, der Außenhülle und dem Innenausbau ein durchschnittlicher Wert im Bereich von ca. 10 – 30 % angenommen werden kann, was zu einer insgesamt geschätzten CO₂-Reduzierung von $0,15 \times 37 \% + 0,25 \times 63 \% = 21 \%$ führt.

Die 20 %-ige Reduzierung wird allerdings zur Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens nicht ausreichen, zumal der angesetzte CO₂-Ausstoß von 25 gCO₂/kWh aktuell ohnehin illusorisch scheint. Um die CO₂-Emissionen auf das zulässige Maß von 32 kgCO₂/m³ BRI zu reduzieren, müssen daher zwingend andere bautechnische Lösungen ausgearbeitet werden.

5.3 Untersuchung zur Verlängerung der Lebensdauer der Gebäude

Bereits in Abschnitt 4.2.4 wurde erläutert, dass sich durch eine längere Nutzungsdauer die auf das Jahr bezogenen CO₂-Emissionen reduzieren. Der Effekt ist darin begründet, dass in der Produktphase A, vor allem durch die Herstellung der Baustoffe, sehr viel CO₂ emittiert wird. Über die Lebensdauer fallen in der Phase B zwar durch Austausch von Verschleißbauteilen weitere Emissionen an, der CO₂-Austoß in kgCO₂/Jahr ist jedoch deutlich geringer als in der Herstellungsphase A bzw. der späteren Rückbauphase C (siehe hierzu auch Bild 4.5 in Abschnitt 4.2.4). Durch eine Verlängerung der Nutzungsdauer verringern sich zwangsläufig die CO₂-Emissionen umgerechnet auf die Zeit in der Einheit kgCO₂/Jahr. Bild 5.3 zeigt die Auswirkungen bei den hier untersuchten Gebäuden. Wenn das Bauwerk im Extremfall für eine Lebensdauer von 200 Jahren ausgelegt würde, verringert sich der auf das Jahr bezogene CO₂-Kennwert gegenüber einer Lebensdauer von 50 Jahren um ca. 50 %, wengleich die kurzfristig anfallende CO₂-Emission für die Erstellung des Bauwerks hierdurch nicht reduziert wird.

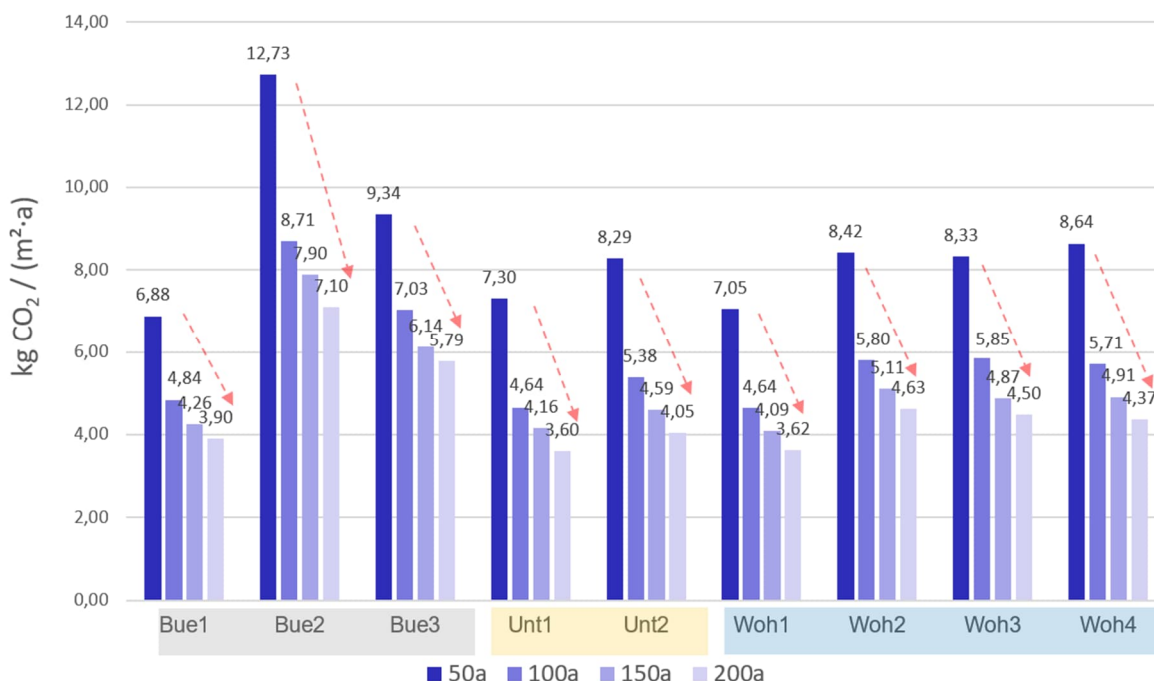


Bild 5.3 CO₂-Emissionen in kgCO₂/(m²·a) der untersuchten Gebäude bei Variation der Lebensdauer

Zusammenfassend bedeutet dies:

- Neubauwerke sollten möglichst für eine lange Lebensdauer konstruiert werden, da somit zumindest die langfristige CO₂-Emission gesenkt werden kann. Im Regelfall ist hierbei nicht davon auszugehen, dass dadurch in der Phase A Mehremissionen anfallen. Für die kurzfristigen CO₂-Emission, die im Wesentlichen bei der Erstellung von neuen Bauwerken anfällt, hat dieses jedoch keinen Einfluss.
- Bei Bestandsbauwerken sollte jedoch im konkreten Bedarfsfalle Einzelfall eine Analyse durchgeführt werden, ob es im Falle eines Rückbaus und (modernerer) Ersatzneubaus nicht ggf. möglich ist, das Bauwerk – mit vertretbarer CO₂-Investition – zu sanieren und zu erhalten und somit die Lebensdauer zu verlängern und die kurzfristig anfallende hohe CO₂-Emission für einen Ersatzneubau zu reduzieren.

5.4 Untersuchung des Einsatzes von Holzbauteilen in der Baukonstruktion

5.4.1 Vorgehensweise

Die Untersuchung im Abschnitt 5.4 zielt darauf ab, zu beurteilen, ob der Holzbau gegenüber der Massivbauweise mit mineralischen Baustoffen einen überlegenden Vorteil bei der Reduzierung von CO₂-Emissionen bietet. Holz ist ein natürlicher Baustoff, der in der Entstehungsphase (als Baum) sehr viel CO₂ bindet und dieses über die gesamte Lebensdauer bis zum Zeitpunkt der Verrottung bzw. Verbrennung speichert. Vielfach wird der Einsatz von Holz auch als zentrale bzw. effizienteste Maßnahme angesehen, die „graue Emission“ zu minimieren. Dieses soll im Folgenden an verschiedenen Beispielen untersucht werden: ein Bürogebäude in Massivholzbauweise, das in zwei Varianten mit und ohne Tiefgarage betrachtet wird, sowie eine Schule im Holz-Beton-Verbundbauweise. Die Ergebnisse der CO₂-Bilanzierung für diese Bauwerke sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6 Übersicht der untersuchten Gebäude in Holz- und Holzverbundbauweise

| | | BueH1 | BueH1a | BueH2 |
|--|--------------------------------------|--|--|---|
| Projekt | | bbp: Verwaltung 2021 | bbp: Verwaltung 2021 | H+H: Schule (Anonym) 2021 |
| Geschossanzahl | | 2-5 + TG | 2 - 5 (Ohne UG) | 3 |
| Fläche Brutto BGF | m ² | 4.478 | 3.275 | 1.715 |
| Fläche Netto NRF | m ² | 3.862 | 2.653 | 1.544 |
| Brutto-Rauminhalt BRI | m ³ | 16.145 | 11.621 | 7.059 |
| Gebäudestandard | | EG 40 | EG 40 | k.A. |
| Planungszeitraum | | 2021 | 2021 | 2021 |
| Bauweise + Fassade | | Holz-Skelettbauweise + hinterlüftete Fassade (Weißtanne) | Holz-Skelettbauweise + hinterlüftete Fassade (Weißtanne) | Holz-Beton-Verbund mit EG im Stb.-Bau + Klinker (EG) und Alufassade (1. - 2.OG) |
| 100a CO ₂ -Emission (A-D) | kgCO ₂ Äq | 1.824.565 | 1.313.243 | 723.384 |
| CO ₂ -Emission / (Fläche BGF · a) | kgCO ₂ /m ² ·a | 4,07 | 4,01 | 4,22 |
| CO ₂ -Emission / (Fläche NRF · a) | kgCO ₂ /m ² ·a | 4,72 | 4,95 | 4,69 |
| CO ₂ -Emission / (Fläche BRI · a) | kgCO ₂ /m ³ ·a | 1,13 | 1,13 | 1,02 |

Die CO₂-Berechnungen wurden zunächst streng nach Norm (EN 15804) bzw. nach ÖKOBAUDAT bilanziert, wobei in der Recyclingphase D von einer stofflichen Verwertung ausgegangen wurde. Basierend auf den Überlegungen des Abschnittes 3.2.2 e) sind jedoch ergänzende Vergleichsrechnungen durchgeführt worden, bei denen in der Erstellungsphase A lediglich die CO₂-Emissionen ab dem Fällen des Baumes berücksichtigt werden und sich der positive Effekt des gespeicherten biogenen CO₂ erst sukzessive durch die nachwachsenden Bäume aufbaut.

Die Vorgehensweise nach EN 15804 bzw. ÖKOBAUDAT ist im Folgenden als Variante A, die alternative Vorgehensweise nach Abschnitt 3.2.2 e) als Variante B bezeichnet worden.

5.4.2 Ergebnisse der Untersuchung

In Bild 5.4 sind die Ergebnisse der CO₂-Bilanzierungen dargestellt die mit dem Rechenansatz A (nach EN 15804 bzw. ÖKOBAUDAT) durchgeführt wurde. Hierbei sind die CO₂-Emissionen der drei in Abschnitt 5.4.1 dargestellten Bauwerke in Holz- bzw. Holz-Beton-Verbundbauweise den zuvor in Abschnitt 4 betrachteten Gebäuden in Massivbauweise gegenübergestellt. Neben der Gesamt-CO₂-Emission ist ergänzend die Aufteilung der CO₂-Emissionen auf die Phasen A-D farblich erkennbar. Hiernach ergibt sich folgendes:

- Der CO₂-Kennwert von Gebäuden im Holz und Holz-Beton-Verbund-Bauweise (HBV) liegt bei etwa 5 kgCO₂/(m²·a). Die Bauwerke liegen damit hinsichtlich der CO₂-Bilanz

grundsätzlich im günstigen Bereich, die Differenzen zu den Bauwerken in Massivbauweise sind quantitativ allerdings gering. Die in Abschnitt 4.3 angegebene Spannweite von ca. 5 bis 7 kgCO₂/(m²·a) über die gesamte Lebensdauer behält daher auch für diese Bauwerke weiterhin Gültigkeit. Der Grund für die ähnlichen Werte liegt darin, dass sich die CO₂-Bilanz der verwendeten Baustoffe über alle Lebenszyklusphasen hinweg nur geringfügig unterscheidet (siehe Bild 4.10 in Abschnitt 4.2.5.2). Der geringe Vorteil von Holz gegenüber Massivbaustoffen im Rohbau wird zudem durch den erforderlichen zusätzlichen Aufbau wieder ausgeglichen (siehe hierzu Abschnitt 5.5 und 5.6).

- Es ist in Bild 5.4 allerdings deutlich zu erkennen, dass die CO₂-Emission in der Herstellungsphase durch die Verwendung von Holzkonstruktion stark reduziert wird. Für die drei untersuchten Gebäude ergibt sich ein Mittelwert von etwa 1,20 kgCO₂/(m²·a), was 120 kgCO₂/m² oder umgerechnet 30 kgCO₂/m³ des Baukörpers entspricht. Im Vergleich dazu liegen die Werte für die Massivbauweise bei 320 kgCO₂/m² bzw. 80 kgCO₂/m³. Allerdings wird dieser Vorteil in der Phase C – der Entsorgungs- und Abfallbehandlungsphase – ausgeglichen, da das im Holz gespeicherte CO₂ wieder freigesetzt wird. Über den kompletten Lebenszyklus hinweg, von Phase A bis D, ist eine Reduzierung der CO₂-Emission durch die Integration von Holz in Gebäudekonstruktionen um circa 20 % zu erwarten.

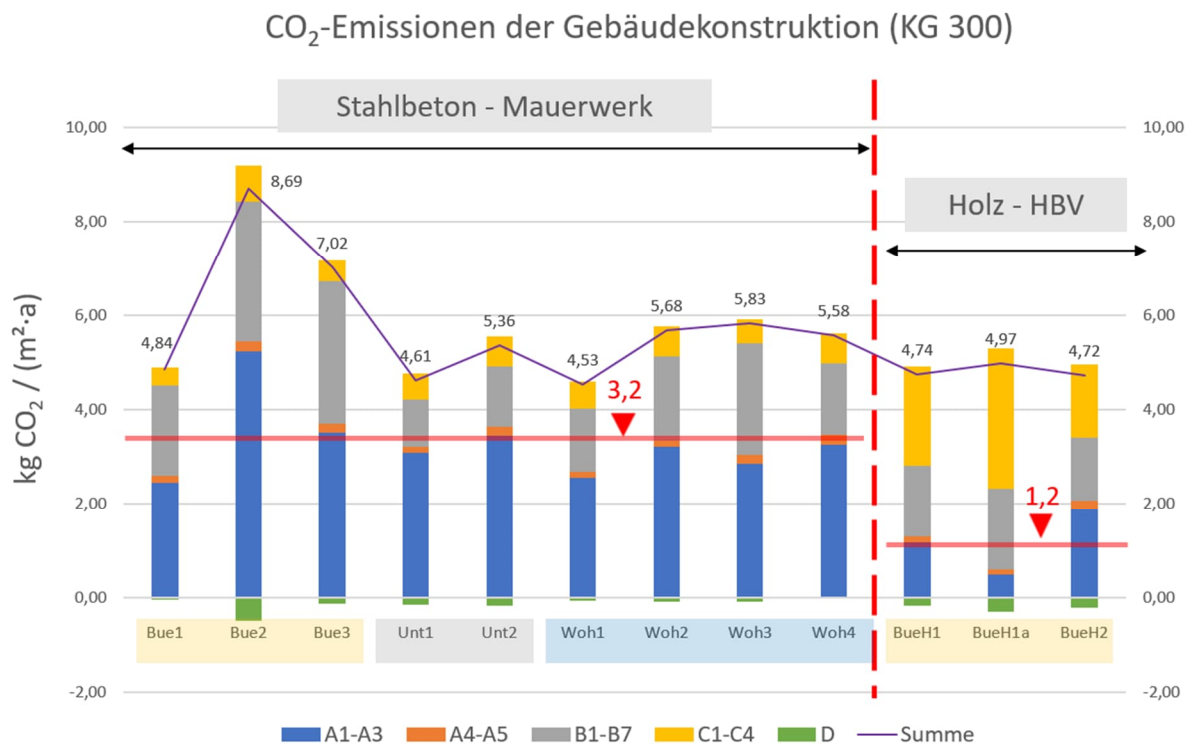


Bild 5.4 CO₂-Emissionen Vergleich Gebäude in Massivbauweise und in Holz- Holzverbundbauweise

Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 erläutert, führt die vorgenannte Bilanzierungsmethode A jedoch bei einem Variantenvergleich, wenn nur die Herstellungsphase A berücksichtigt wird, zu technisch fragwürdigen Ergebnissen, vor allem bei Bauteilen, bei denen die Lebensdauer bzw. Nutzungsphase geringer als die Hiebreeife des Baumes ist. Daher wird vergleichend eine zweite Berechnung durchgeführt, bei der der alternative CO₂-Ansatz (Ansatz B) zur Berücksichtigung des Werkstoffs Holz nach dem Abschnitt 3.2.2 herangezogen wird. Hier wird in der Phase A lediglich die CO₂-Emission ab dem Fällen des Baumes berücksichtigt und der negative Abzugswert durch das gespeicherte biogene CO₂ baut sich erst über die Lebensdauer durch das Nachwachsen eines neu gepflanzten Baumes wieder auf.

Die ergeben sich hiermit folgende Ergebnisse (siehe Bild 5.5):

- Die Verteilung der CO₂-Emissionen über die einzelnen Phasen A-D des Lebenszyklus variiert je nach Wahl des Bilanzierungsansatzes A oder B. Bei der CO₂-Bilanz nach dem Ansatz A sind die CO₂-Emissionen in der Phase A gering, während die Emission in der Phase C einen hohen Anteil ausmacht. Mit dem Bilanzierungsansatz B verlagert sich die CO₂-Belastung stärker auf die Phase A, während die Phase C deutlich weniger zur Gesamtbilanz beiträgt. Solange die Lebensdauer im Bereich der Hiebreife der nachwachsenden Bäume liegt, ist das Ergebnis im Hinblick auf die Gesamtbilanz daher identisch, größere Unterschiede würde sich hier lediglich bei Holzbauwerken mit kurzer Lebensdauer ergeben, da bei dem Rechenansatz B lediglich der biogene CO₂-Anteil, der bis zum Rückbau durch den nachwachsenden Baum gebunden wurde, positiv in Ansatz gebracht werden kann.
- Deutliche Unterschiede ergeben sich lediglich hinsichtlich der CO₂-Emission in den einzelnen Phasen A und D. Hierbei ist nach dem Bilanzierungsansatz B der Vorteil der Holzbauteile in der Phase A (Produktion und Errichtung) weniger ausgeprägt. Der CO₂-Wert in der Herstellungsphase (Module A1-A3) von Gebäuden in Holz- und Holzverbundbauweise liegt bei etwa 2,8 kgCO₂/m²·a, nur geringfügig unter dem Wert für Massivbauten (3,2 kgCO₂/m²·a). Umgerechnet entspricht dies etwa 280 kgCO₂/m² oder 70 kgCO₂/m³.

Im Vergleich zwischen der Holz- und der Massivbauweise ist hinsichtlich der CO₂-Bilanz ein leichter Vorteil der Holzbauweise in der Phase A und über die gesamte Lebensdauer (Phase A-D) erkennbar, die Unterschiede sind allerdings deutlich geringer als in der allgemeinen öffentlichen Diskussion.

Da die Studie auf einer begrenzten Anzahl von Holz- und Holzverbundgebäuden basiert, sind die dargestellten Werte als Orientierungshilfen zu betrachten. Es besteht Bedarf an weiterführenden Studien mit einer größeren Anzahl untersuchter Gebäude, um eine verlässlichere Datenbasis zu schaffen.

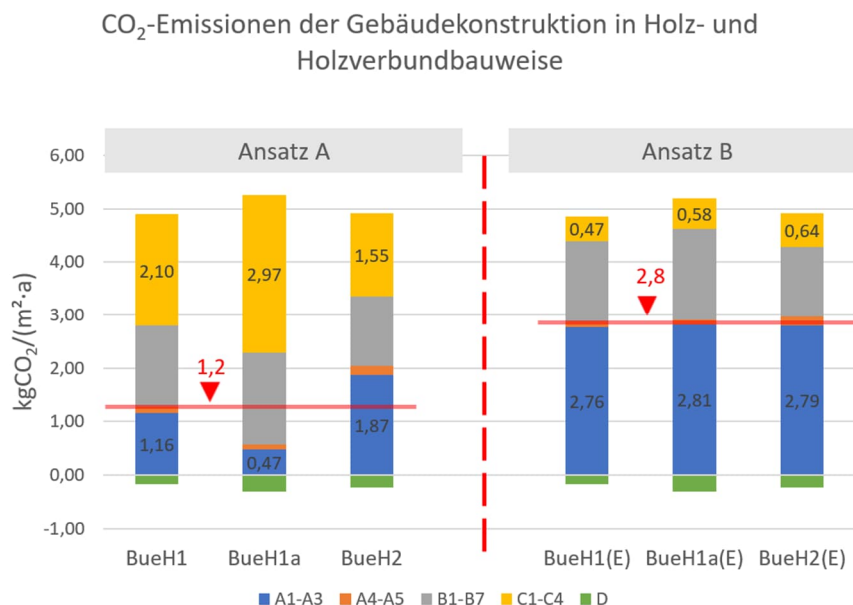


Bild 5.5 CO₂-Emissionen von Gebäuden in Holz- und Holzverbundbauweise, verteilt nach Lebenszyklusphasen, Vergleich der CO₂-Bilanzen mit den Berechnungsansatz A und B für Holzprodukte

In den folgenden Abschnitten wird kleinteiliger versucht, die CO₂-Emission in den einzelnen Bauteilen zu optimieren.

5.5 Untersuchung hinsichtlich Deckensysteme

5.5.1 Auswahl der Deckensysteme und Randbedingungen

Die in Abschnitt 4.2.5 durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Decken (KG 350) die Bauteile mit den größten CO₂-Emission sind (Bild 4.6). Dieses Ergebnis deckt sich auch mit Untersuchungen aus der Literatur wie die DGNB-Studie (2021) [4] und Bericht von Mahler et al. (2019) [15]. Während die Deckensysteme in den eigenen Untersuchungen etwa 33 % der Gesamt-CO₂-Emission des Gebäudes ausmachen, ergeben sich dieses bei der DGNB (Abbildung 3, Seite 7) zu 37 % und bei Mahler (Abbildung 18, Seite 51) nach Umrechnung zu rund 28 %.

Daher hat es bereits zahlreiche Untersuchungen zur Optimierung von Deckensystemen hinsichtlich der CO₂-Bilanz gegeben, wie Weidner et al. (2021) [1] und Heckmann und Glock (2023) [33]. Auch die neue Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zu Treibhausgasreduzierten Tragwerken aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton aus dem August 2024 [34] enthält einen separaten Teil zu Deckenbauteilen.

In den o. g. Studien wurde jedoch vornehmlich die Rohbaudecke betrachtet und daher die Funktion auf die statisch-konstruktiven Aspekte begrenzt. In Summe haben Decken ja die folgenden Funktionen zu übernehmen:

- Standsicherheit (inklusive mit statischen Aspekten verbundene Gebrauchsfähigkeit wie Deckendurchbiegung oder Schwingungsverhalten)
- Brandschutz
- Schallschutz

Diese Funktionen werden nicht nur durch die Rohbaudecke sichergestellt, sondern teilweise (siehe z. B. Schallschutz oder Brandschutz bzw. Schwingungsverhalten bei Holzbauweisen) sind hierzu auch die Fußbodenaufbauten oder Verkleidungen erforderlich. Um letztlich Deckensysteme zu vergleichen, die alle Anforderungen erfüllen, werden im Folgenden nicht nur die Rohbaudecke, sondern der gesamte Deckenaufbau betrachtet. Hierbei wird von den folgenden Randbedingungen ausgegangen:

Deckensysteme

Es wird eine möglichst große Spannweite an Systemen und Materialien betrachtet. Im Einzelnen handelt es sich hierbei um:

- Stahlbetondecke (liniengelagert)
- Spannbeton-Hohlkörperdecke
- Spannbeton-Rippendecke / Pi-Platte
- Holz-Beton-Verbunddecke
- Holzbalkendecke mit Deckenauflage aus Lehmsteinen

Statisches System

- Um die Ergebnisse besser vergleichen bzw. alle Deckensysteme einbeziehen zu können, wird ein einachsig gespanntes Deckensystem betrachtet.
- Zusätzlich wird zur Vereinfachung ein Einfeldträgersystem herangezogen.

Deckenspannweite

- Es werden zwei verschiedene Spannweiten untersucht: 6,0 m
 9,0 m

Hierbei ist zu beachten, dass jedoch nicht alle Systeme bei einer Spannweite von 9,0 m einsetzbar sind, die folgende Tabelle gibt einen Überblick, welches System bei welcher Spannweite in die Untersuchung einbezogen wurde.

| | System | Spannweite | |
|------------|---|------------|-------|
| | | 6,0 m | 9,0 m |
| D1 | Stahlbetondecke | X | |
| D2a D2b | Spannbeton-Hohlkörperdecke | X | X |
| D3a D3b | Stahlbeton Rippendecke / Pi-Platte | X | X |
| D4a D4b | Holz-Beton-Verbund Decke (Holzbalken) Holz-Beton-Verbund Decke (Brettstapel mit Schraubenverbindung) | X X | |
| D5 | Brettsper Holzdecke | X | |
| D6 | Holzbalkendecke mit Deckenauflage aus Lehmstein | X | |

Betrachtete Nachweise

Die Decke (unter Berücksichtigung des Deckenaufbaus) wurde für die folgenden Nachweise bemessen bzw. die Abmessungen diesbezüglich optimiert:

- Standsicherheit (Grenzzustand der Tragfähigkeit)
- Deckendurchbiegung
- Schwingungsverhalten
- Schallschutz: Betrachtung der Luftschalldämm-Maße und Trittschalldämm-Maße der Decken mit fertigem Aufbau (ohne Belag)
- Brandschutz: konstruktive Anforderungen

Statische Belastung der Decke

Für die Deckensysteme wurde folgende statische Beanspruchung aufgebracht:

| | | | |
|----------------------------------|---|----------------------|-----|
| Eigenlast der Rohbaukonstruktion | | in kN/m ² | |
| Aufbau (Estrich, Belag, etc.) * | | in kN/m ² | 2,0 |
| Nutzlast | Trennwandzuschlag | in kN/m ² | 1,2 |
| | Unterdeckenbekleidung, abgehängte Elemente | in kN/m ² | 0,3 |
| | Verkehrslast gemäß DIN EN 1991-1-1/NA, Tabelle 6.1 (maßgebend: Bürogebäude) | in kN/m ² | 2,0 |

*) Zementestrich (2400) Dicke: 5 cm bis 8 cm

Anforderungen an den Schallschutz

Bezüglich der Schallschutzanforderungen bzw. -nachweise wurde wie folgt vorgegangen:

- Anforderung an Luftschalldämmung und Trittschalldämmung in Mehrfamilienhäusern nach DIN 4109-5:2020-08 – Tabelle 1, Zeile 2 [35]
- Hierbei wurden gemäß DIN 4109-5 erhöhte Anforderungen an den Schallschutz für Wohnungstrenndecken bzw. Büro- und Verwaltungsgebäude angesetzt:
 - + Luftschalldämmung: erf. $R'_w \geq 57$ dB
 - + Trittschalldämmung: erf. $L'_{n,w} \leq 45$ dB
- Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchung wurde lediglich die Schalldämmung der einzelnen Bauteile betrachtet, die Flanken bzw. Stoßstellen wurden nicht berücksichtigt. Ein Vorhaltmaß von 2 dB wurde in die Berechnung einbezogen. Korrekturwerte ($K_{L,1,2}$) bei der Ermittlung der Trittschalldämmung erfolgen der in der DIN geregelten Tabellenwerten.

Festlegung Fußbodenaufbau

Die Festlegung des Fußbodenaufbaus wurden unter typischen praktischen Gesichtspunkten gewählt, darüber hinaus waren folgende Randbedingungen zu beachten:

- Die Anforderungen an den Schallschutz bzw. den Brandschutz müssen erfüllt sein.
- Bei leichten Holzdecken wurde die Luftschallübertragung bzw. der Nachweis der Schwingungsbegrenzung durch entsprechendes Gewicht im Aufbau sichergestellt.
- Bei massiven Decken wurden die Trittschall-Dämm-Maße durch den Einsatz einer entsprechenden Trittschalldämmungsplatte erreicht.

Anforderung an den Brandschutz:

- Die hier betrachteten Gebäude fallen im Regelfall in den Bereich der Gebäudeklasse 3-5; hier müssen die tragenden Bauteile nach Landesbauordnung feuerhemmend (GK 3), hochfeuerhemmend (GK 4) bzw. feuerbeständig (GK 5) ausgeführt werden.
- Bei Stahlbetondecken lassen sich die Anforderungen aller Gebäudeklassen durch Einhalten der entsprechenden Betondeckung problemlos erfüllen.
- Bei den Holzdecken wird die Unterseite zur Sicherstellung des Brandschutzes mit zwei Gipskartonplatten (Dicke jeweils 12,5 mm) verkleidet.

Bodenbelag

- Der Bodenbelag wurde in der Berechnung nicht berücksichtigt.

CO₂-Berechnung

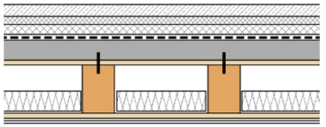
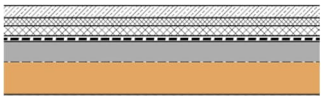
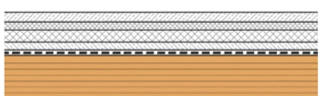
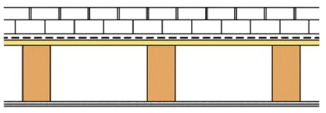
- Nachdem die Decken mit den o. g. Anforderungen bemessen wurden, so dass die Abmessungen festgelegt sind, wurde eine CO₂-Berechnung durchgeführt. Hierbei wurde von einer Nutzungsdauer von 100 Jahren ausgegangen.
- Die CO₂-Emissionen wurden getrennt für Phase A (Module A1 bis A5) sowie für alle Phasen A bis D ausgewertet und analysiert. Die Ergebnisse sind jeweils in kgCO₂/(m²·a) angegeben und unterschieden zwischen der Rohbaudecke und der Gesamtedecke.

5.5.2 Ergebnisse der Bemessung und CO₂-Berechnung

Die vorgenannten Deckensystemen sind mit den o. g. Randbedingungen bemessen worden. Hiernach ergaben sich die in der Tabelle 7 zusammengestellten Abmessungen.

Tabelle 7 Übersicht der untersuchten Deckensysteme in typischen Büro- und Wohngebäuden

| Nr. | Bezeichnung der Decke / Skizze | Spannweite [m] | Rohdecke | Schichtenaufbau (von unten nach oben; nur relevante Lage / Komponente) | Besonderheit |
|-----|---|----------------|--|--|--|
| D1 | Stahlbetondecke  | 6,0 | Betonplatte d = 25 cm, C30/37 Bewehrungsmenge 80 kg/m ³ | Aufbau: 2 lagige Dampfsperre 5 cm Wärmedämmung XPS 3 cm Trittschalldämmung EPS, s' = 15 MN/m ³ 6 cm Zementestrich (Rohdichte 2400 kg/m ³) | - Ortbeton |
| D2a | Spannbeton-Hohlkörperdecke  | 6,0 | Spannbeton-Hohlkörperplatte d = 20 cm, C45/55 Spannstahl a_z oben = 65 mm ² /m und a_z unten = 412 mm ² /m | Aufbau: 2 lagige Dampfsperre 5 cm Wärmedämmung XPS 3 cm Trittschalldämmung EPS, s' = 10 MN/m ³ 6 cm Zementestrich (Rohdichte 2400 kg/m ³) | - Fertigteilprodukt BRESPA A20Q - Gewicht 359 kg/m ² ; Nennwert für Schallschutznachweis 345 kg/m ² |
| D2b | Spannbeton-Hohlkörperdecke  | 9,0 | Spannbeton-Hohlkörperplatte d = 26 cm, C45/55 Spannstahl a_z oben = 65 mm ² /m und a_z unten = 552 mm ² /m | Aufbau: Wie D2a | - Fertigteilprodukt BRESPA A26Q - Gewicht 426 kg/m ² ; Nennwert für Schallschutznachweis 409 kg/m ² |
| D3a | Stahlbeton Pi-Platte  | 6,0 | Betonplatte d = 16 cm (aus 9 cm Fertigteil und 7 cm Ortbeton), C45/55 Balken 2 St. je 2,5 m Plattenbreite, b/h = 20/20 cm, C45/55 Bewehrungsmenge 80 kg/m ³ | Aufbau: 2 lagige Dampfsperre 5 cm Wärmedämmung XPS 3 cm Trittschalldämmung EPS, s' = 10 MN/m ³ 6 cm Zementestrich (Rohdichte 2400 kg/m ³) | - Halbfertigteil Plattenbreite je 2,5m |
| D3b | Stahlbeton Pi-Platte  | 9,0 | 16 cm Betonplatte aus 9 cm Fertigteil und 7 cm Ortbeton, C45/55 Balken 2 St. je 2,5 m Plattenbreite, Abmessung b/h = 20/40 cm Bewehrungsmenge 80 kg/m ³ | Aufbau: Wie D3a | - Halbfertigteil Plattenbreite je 2,5m |

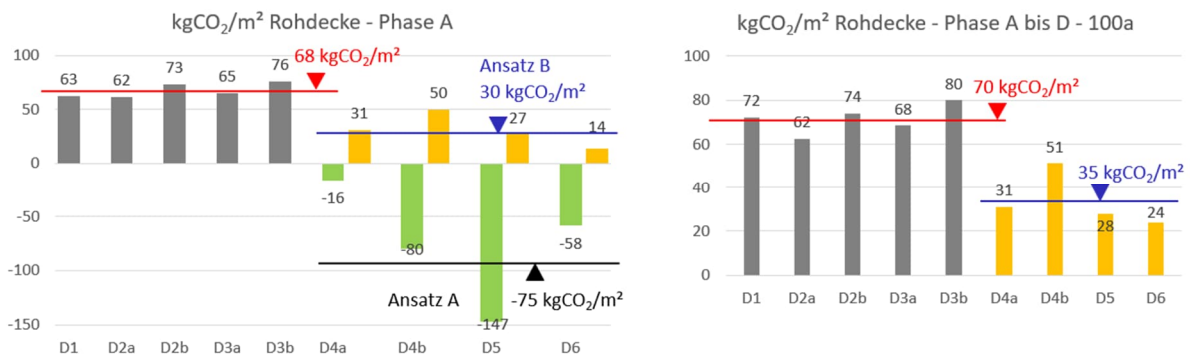
| | | | | | |
|-----|---|-----|--|---|--|
| D4a | <p>Holz-Beton-Verbund Decke (Holzbalken mit Schraubenverbindung)</p>  | 6,0 | <p>Betonplatte d = 10 cm, C25/30 Bewehrung 1 Lage Q257A Holzbalken: VH C24 b/h = 16/24 cm; Achsabstand e = 625 mm (Holzdielen nach Empfehlung zw. Holzbalken und Betonplatte d = 24 mm) Verbindungsmittel: ca. 40 St. Schrauben /2m² Decke – D10 360 mm</p> | <p>Aufbau: 5 cm Wärmedämmung XPS 4 cm Trittschalldämmung EPS, s' < = 8 MN/m³ 6 cm Zementestrich (Rohdichte 2400 kg/m³) Unterdecke: Dämmplatte (Zwischenraum) d = 10 cm Traglattung aus Holzlatten – Dicke d = 24 mm, Achsabstand e >= 400 mm Unterdecke: Bekleidung aus 2 x 12,5 mm GKF-Platte (Gipskarton-Feuerschutzplatte)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Schwingungen: Berücksichtigung des 6 cm Estrichs - Brandschutz mit Betondeckung Cv = 3 cm und Unterdeckenverkleidung mit 2 lagige GKF 12,5 mm für Holzbauteile |
| D4b | <p>Holz-Beton-Verbund Decke (Brettstapel mit Schraubenverbindung)</p>  | 6,0 | <p>Betonplatte d = 10 cm, C25/30 Bewehrung 1 Lage Q257A Holzplatte: BSH GI24h d = 16 cm Verbindungsmittel: ca. 40 St. Schrauben /2m² Decke – D10 360 mm</p> | <p>Aufbau: Trennlage aus PE-Folie 5 cm Wärmedämmung XPS 4 cm Trittschalldämmung EPS, s' < = 7 MN/m³ 6 cm Zementestrich (Rohdichte 2400 kg/m³) Unterdecke: Bekleidung aus 2 x 12,5 mm GKF-Platte (Gipskarton-Feuerschutzplatte)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Die Holzplatte mit d = 12 cm erfüllt die statischen Anforderungen. - Zur Sicherstellung eines Trittschallschutzes mit L_{n,w} < 45 dB wird jedoch eine Platte mit d = 16 cm gewählt. |
| D5 | <p>Brettsper Holzdecke</p>  | 6,0 | <p>Brettsper Holz Pfeifer 220 7s – aus 7 Schichten C24, d = 22 cm</p> | <p>Aufbau: Min 4 cm Rohdeckenbeschwerung aus Betonsteinplatten (m' > = 100 kg/m²) 5 cm Wärmedämmung XPS 4 cm Trittschalldämmung EPS, s' < = 6 MN/m³ 6 cm Zementestrich (Rohdichte 2400 kg/m³)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Die Vorbemessung erfolgt mit dem Pfeifer-Tool, das eng mit den spezifischen Holzprodukten und deren bauaufsichtlicher Zulassung verknüpft ist. |
| D6 | <p>Holzbalkendecke mit Deckenauflage aus Lehmsteine</p>  | 6,0 | <p>Holzbalken VH C24 b/h = 14/28 cm mit e = 62,5 cm, L = 6,0m (5,5m) Holzdielen OSB Klasse 3, d = 2,5 cm</p> | <p>Aufbau: 1 Lage Rieselschutzpaper 7,1 (7,5) cm Lehmsteine 135 kg/m² [Beispielsweise CLAYTEC Produkte] 6 cm Holzfaserdämmplatten als Trittschalldämmung, s' < = 10 MN/m³ Unterdecke: Bekleidung aus 2 x 12,5 mm GKF-Platte (Gipskarton-Feuerschutzplatten)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Schwingungen: Berücksichtigung des 7,1 cm Lehmsteine - Brandschutz: Unterdeckenverkleidung mit 2 lagige GKF 12,5mm |

Die Ergebnisse der durchgeführten CO₂-Bilanzierungen wurden in Tabelle 8 und Bild 5.6 dargestellt.

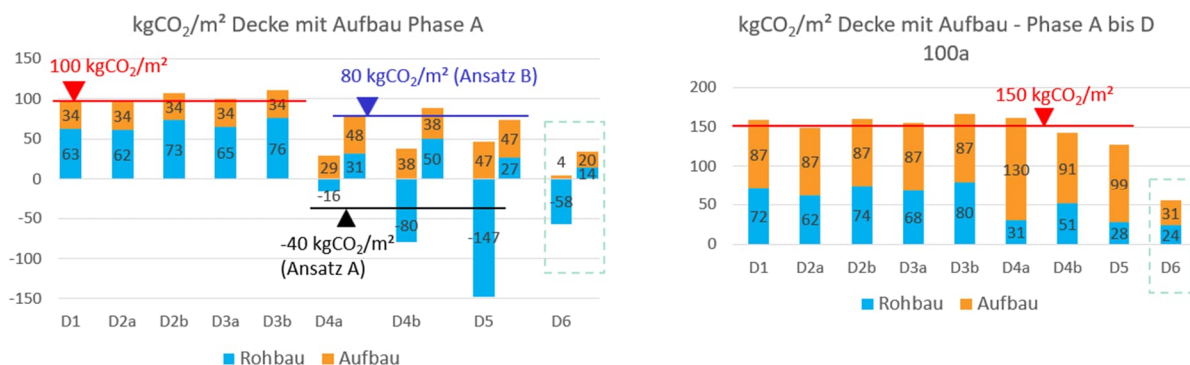
Tabelle 8 Übersicht der CO₂-Emissionen des Rohbaus, des Aufbaus sowie Gesamtemission der betrachteten Deckensysteme

| Var | Beschreibung - Spannweite | Rohbau | | Aufbau | | Gesamt | |
|-----|---|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
| | | kgCO ₂ /m ² | | kgCO ₂ /m ² | | kgCO ₂ /m ² | |
| | | A1-A5 | A-D (100a) | A1-A5 | A-D (100a) | A1-A5 | A-D (100a) |
| D1 | Stahlbetondecke 6 m | 63 | 72 | 34 | 87 | 97 | 159 |
| D2a | Spannbeton-Hohlkörperdecke 6 m | 62 | 62 | 34 | 87 | 95 | 149 |
| D2b | Spannbeton-Hohlkörperdecke 9 m | 73 | 74 | 34 | 87 | 107 | 161 |
| D3a | Stahlbeton Pi-Platte 6 m | 65 | 68 | 34 | 87 | 99 | 155 |
| D3b | Stahlbeton Pi-Platte 9 m | 76 | 80 | 34 | 87 | 110 | 166 |
| D4a | HBV Decke (Balken - Schrauben) 6 m | -16 | 31 | 29 | 130 | 13 | 161 |
| D4b | HBV Decke (Brettstapel - Schrauben) 6 m | -80 | 51 | 38 | 91 | -43 | 143 |
| D5 | Brettsperrholzdecke 6 m | -147 | 28 | 47 | 99 | -100 | 127 |
| D6 | Holzbalkendecke mit Deckenauf- lage aus Lehmsteine 6 m | -58 | 24 | 5 | 31 | -53 | 56 |

(a) CO₂-Emissionen [kgCO₂/m²] der Rohdecken in Phase A (Module A1-A5) (links) und über alle Phasen A bis D (rechts)



(b) CO₂-Emissionen [kgCO₂/m²] der Gesamtdecken (Rohdecken mit Deckenaufbau) in Phase A (Module A1-A5) (links) und über alle Phasen A bis D (rechts)



(c) CO₂-Emissionen [kgCO₂/m²] der Gesamtdecken in einer Zusammenstellung (* hier wurden in Phase A die CO₂-Emissionen von Holzbauteilen standardmäßig mit dem Ansatz A bilanziert)

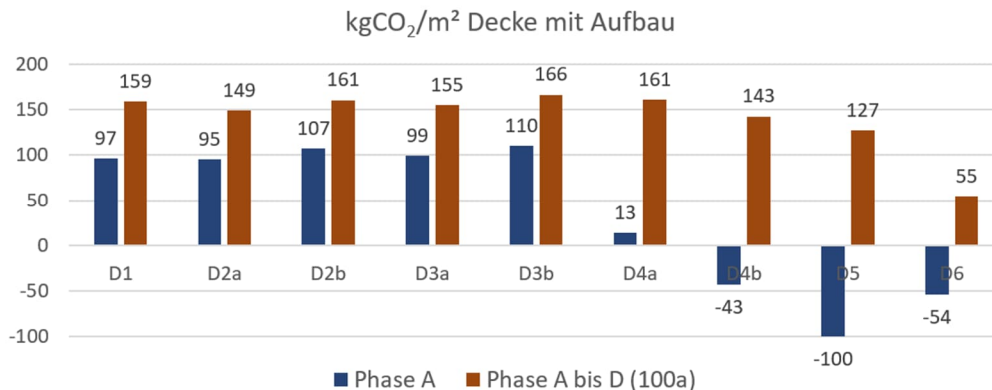


Bild 5.6 CO₂-Emissionen [kgCO₂/m² Deckenfläche] der einzelnen untersuchten Deckensysteme bezogen auf die Herstellungsphase (Phase A) und den gesamten Lebenszyklus (Phase A bis D) über 100 Jahre, dargestellt für (a) Rohbau, (b) Decke mit Aufbau und (c) Übersicht der Gesamtdecken

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ergibt sich wie folgt:

- Die CO₂-Emissionen einer Stahlbetondecke in Rohbau liegt in der Phase A (Module A1-A5) bei etwa 68 kgCO₂/m² bzw. bei Betrachtung über die gesamte Lebenszyklus (Phasen A-D) bei etwa 70 kgCO₂/m² (Bild 5.6 a).

Bei einer Rohdecke in Holzbetonverbund- und Holzbauweise lassen sich die CO₂-Aufwendungen gemäß dem eigenen Bilanzierungsansatz für Holzprodukte (Ansatz B) nahezu um die Hälfte auf etwa 30 kgCO₂/m² in Phase A und auf etwa 35 kgCO₂/m² über alle Phasen A bis D reduzieren. Unter Anwendung des Standardansatzes A ergibt sich für den CO₂-Austoß der Decke in Phase A sogar ein negativer CO₂-Abzugswert von -75 kgCO₂/m² (Bild 5.6 a).

Die CO₂-Emissionswerte für den Deckenrohbau stimmen weitgehend mit den in der Fachliteratur angegebenen Werten überein. In der Richtlinie Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton des DAfStb (2024) [34], in der Decken für die Module A1-A3 sowie C3 und C4 über einen Zeitraum von 50 Jahren bilanziert wurden, liegen die GWP-Werte für liniengelagerte Stahl- und Spannbetondecken mit einer Spannweite von 6,0 m bis 9,0 m im Bereich von etwa 55 kgCO₂/m² bis 85 kgCO₂/m² (Bild 5.7). Der durchschnittliche Wert beträgt hierbei auch ca. 70 kgCO₂/m². Für eine 6,0 m gespannte Holz-Beton-Verbunddecke wurde ein CO₂-Wert von ca. 55 kgCO₂/m² angegeben, während der CO₂-Austoß einer Massivholzdecke bei ca. 35 kgCO₂/m² liegt. Diese Werte entsprechen den Ergebnissen der eigenen Untersuchung.

In der Studie von Heckmann und Glock (2023) [33] wurden die CO₂-Emissionen von Rohbaudecken mit gleichen Systemgrenze (Module A1-A3, C3, C4 und über 50 Jahre) betrachtet. Die Emissionswerte für Stahlbeton- und Spannbetondecken betragen hiernach ca. 55 kgCO₂/m², was etwas unter den eigenen Ergebnisse (70 kgCO₂/m²) liegt. Für die Massivholzdecke entsprechen die Werte beider Untersuchungen mit jeweils ca. 30 kgCO₂/m² einander.

Die ersten Ergebnisse decken sich mit der generellen in der Literatur dokumentierten Erkenntnis, dass durch den Ersatz massiver Betondecken durch Holzbauweisen signifikante CO₂-Einsparungen erzielen werden können.

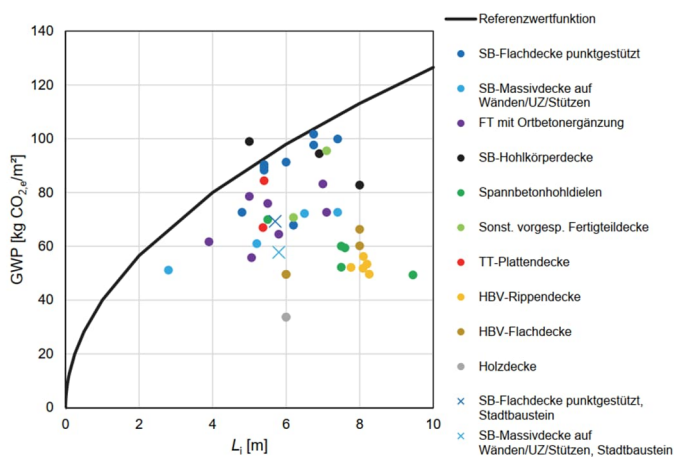


Bild E.1 – Datenpunkte für das GWP der Deckenbauteile und Funktionsgraph der Referenzwertfunktion

Bild 5.7 CO₂-Wert der Rohdecken in unterschiedlichen Bauweisen – Auszug aus DAfStb-Richtlinie [34], S. 36

- Wenn die Gesamtdecke, also der Rohbau und der Deckenaufbau, betrachtet werden, wachsen die CO₂-Aufwendungen um mehr als das Doppelte an (Bild 5.6 b). Dies ist hauptsächlich auf die Dämmplatten und den schwimmenden Estrich zurückzuführen, die einerseits hohe CO₂-Emissionen bei der Herstellung verursachen und andererseits aufgrund ihrer kurzen Nutzungsdauer (ca. 50 Jahre) über 100 Jahre hinweg mindestens einmal ausgebaut und ersetzt werden müssen.

Hierbei ist vor allem auch überraschend, dass sich die CO₂-Emissionen der Decken, die in Massivbauweise und derjenigen, die in Holzbauweise erstellt wurden, im Laufe des Lebenszyklus einander angleichen. Wenn alleine die Bauphase A betrachtet wird, so liegt der CO₂-Bedarf einer Stahlbetondecke mit ca. 100 kgCO₂/m² um ca. 20 % höher als der CO₂-Bedarf der HBV-/ Holzdecke, die bei etwa 80 kgCO₂/m² liegt. Wenn jedoch die gesamte Lebensdauer berücksichtigt wird, liegen die CO₂-Emissionen aller Deckensysteme bei ca. 150 kgCO₂/m² Deckenfläche. Lediglich die Holzbalkendecke mit den Lehmsteinen schneidet hierbei um knapp 60 % günstiger ab (Bild 5.6 b).

Demzufolge weist die Rohbaudecke aus Holz tendenziell eine CO₂-intensiveren Aufbau auf. Der Grund dafür liegt z. B. in der etwas dickeren Dämmplatte für die Trittschalldämmung, die bei den Holz-Beton-Verbunddecken (HBV) und den Holzdecken (Variante D4a, D4b, D5) mit 4 cm gegenüber 3 cm bei den Betondecken verwendet wird. Besonders bei der HBV-Decke mit Holzbalken (D4a) wurde zusätzlich eine 10 cm dicke Dämmplatte in den Zwischenräumen der Balken eingebaut (Tabelle 7). Zusammen mit dem 6 cm Zementestrich führen diese Dämmstoffe zu CO₂-Emissionen von rund 130 kgCO₂/m² über 100 Jahre, was deutlich höher ist als die CO₂-Emissionen des Ausbaus bei Stahlbetondecken, die etwa 90 kgCO₂/m² ausmachen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die am Markt verfügbaren Deckensysteme in Summe aktuell zu ähnlichen CO₂-Emissionen von ca. 150 kgCO₂/m² Deckenfläche über die gesamte Lebensdauer führen. Die Anwendung von Holzbauweisen führt hier nur zu geringfügig reduzierten Werten.

5.6 Untersuchung hinsichtlich Außenwandsystemen

5.6.1 Auswahl der Wandsysteme und Randbedingungen

Als zweite große Komponente des Rohbaus wird im Folgenden untersucht, was im Hinblick auf die CO₂-Bilanz optimale Außenwandsysteme sind und wie sich diese ggf. optimieren lassen. Gemäß den durchgeführten Untersuchungen haben die Außenwände inklusive Dämmung einen Anteil von ca. 15 % an der „grauen Emission“ des Gesamtgebäude.

Ähnlich wie bei den Deckensystemen werden auch hier verschiedene Standardsysteme massenmäßig vordimensioniert und anhand der resultierenden CO₂-Bilanz miteinander verglichen. Bei der Dimensionierung sind die folgenden Anforderungen zu beachten:

- Standsicherheit (tragende bzw. aussteifende Funktion)
- Brandschutz
- Wärmeschutz: Schutz vor Wärmeverlusten im Winter und Überhitzung im Sommer
- Schallschutz: Schutz vor allem Außenlärm – Luftschall
- Feuchteschutz, Witterungsschutz, Lüftung etc...

Im Folgenden sind die Randbedingungen bei der Festlegung bzw. Dimensionierung der Deckensysteme zusammengestellt:

Wandsysteme

Hinsichtlich der Materialien wird eine möglichst große Bandbreite variiert. Hierbei werden sowohl massive Bauweisen (Stahlbeton, Mauerwerk) als auch unterschiedliche Holzbauweisen untersucht. Im Bereich der Massivbauweise wurde als Alternative auch die Variante betrachtet, durch Verwendung von Porenbetonsteinen mit entsprechender Dicke, auf die Außenwärmedämmung zu verzichten. Eine weitere Option für monolithische Wand umfasst Hochlochziegel, die mit Mineralwolle gefüllt sind. Konkret wurden die folgende Wandtypen berücksichtigt:

- W1: Stahlbetonwand mit Außendämmung
- W2: Mauerziegel als gefüllter Hochlochziegel Hlz (bzw. Poroton-Planziegel) mit Dünnbettmörtel DM
- W3: Kalksandstein als Vollstein KS mit Dünnbettmörtel DM mit Außendämmung
- W4: Porenbetonstein aus Porenbeton-Planelemente PPE mit Dünnbettmörtel DM
- W5a: Holztafelbau mit integrierter Dämmung
- W5b: Massivholzbau mit Außendämmung

Variation Gebäudehöhe

- Zur Bemessung der Standsicherheit und zur Beurteilung des Bandschutzes ist die Gebäudehöhe relevant.
- Es werden Gebäudehöhen von 12 -15 bzw. 20 m betrachtet; gemäß Landesbauordnung entspricht dieses den Gebäudeklassen GK 4 bzw. GK 5.

Standsicherheit

Im Falle einer Massivbauweise / Mauerwerkswand wurde im Zuge der Vorbemessung folgendermaßen vorgegangen:

- Die statische Vorbemessung wurde nach dem vereinfachten Berechnungsverfahren nach EC-6-3/NA:2019-12 geführt. Hieraus ergeben sich Mindestwanddicken nach EC-6-1-1/NA:2019-12 (S. 36).

- Die Berechnung wurde mit Hilfe des Tool VWall „vereinfachte Statikberechnung nach EC6 – V2.0.2“ (Hersteller KS-Kalksandstein, <https://shop.ks-original.de/vwall?c=14>) durchgeführt. Die einwirkende Auflast N_{Ed} wurde zwischen 180 – 250 kN/m variiert.
- Im Falle einer Holzbauweise / Holzaußenwand wurden die Abmessungen anhand vorhandener Planungen und überschlägiger Vordimensionierung festgelegt.

Schallschutz

Bezüglich des Schallschutzes wurde wie folgt vorgegangen:

- Es wurde lediglich das direkte Schalldämmmaß des Außenbauteils berechnet.
- Die Berechnung erfolgte für einen virtuellen Raum mit den Abmessungen $L \times W \times H = 4 \text{ m} \times 3,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$.
- Für den maßgeblichen Außenlärmpegel wurde der Lärmpegelbereich Stufe III (61 bis 65 dB) angesetzt, basierend auf der Lärmkarte Kiel (überwiegen Stufe II und III).
- Es wurde eine Prognoseunsicherheit von $u_{\text{prog}} = 2 \text{ dB}$ berücksichtigt.
- Die Ermittlung des erforderlichen bewerteten, resultierenden Luftschalldämmmaßes von Außenwand wurde gemäß DIN 4109-1 [36], Abschnitt 7.1 für Aufenthaltsräume in Wohnungen durchgeführt. Unter Berücksichtigung der Korrekturwerte ergibt sich ein erforderliches $R'_{w,\text{ges}} \geq 40 \text{ dB}$.

Wärmeschutz

- Bei der Untersuchung wurde der U-Wert nur bis zur Außenkante der Putzschicht berechnet, ohne Berücksichtigung einer komplexen Fassadenebekleidung.
- Für Wände mit Außendämmung wurde lediglich eine einfache Putzfassade aus mineralischem Außenputz (z.B. Kalkzementputz, Dicke ca. 1,5 cm) für die Berechnung angesetzt. Als Dämmmaterial für die Außendämmung wurde einheitlich Mineralwolle WLG 035 gewählt.
- Der erforderliche U-Wert der Außenwand beträgt $0,24 \text{ W(m}^2\text{K)}$ gemäß GEG 2024 [37] (Tabelle in Anlage 7, Zeile 1a).

Brandschutz

- Die hier betrachteten Gebäude fallen in den Bereich der Gebäudeklasse 4 und 5; hier müssen die tragenden Bauteile nach Landesbauordnung hochfeuerhemmend (GK 4) bzw. feuerbeständig (GK 5) ausgeführt werden, darüber hinaus muss die Oberfläche der Außenwände sowie die Außenwandbekleidung einschließlich Dämmstoff und Unterkonstruktion schwer-entflammbar sein.
- Es wird davon ausgegangen, dass sich die Anforderungen durch konstruktive Ausbildung bzw. durch entsprechende Materialauswahl sicherstellen lassen. Lediglich Brandwände können (zumindest in Schleswig-Holstein) im Falle der Gebäudeklasse 5 nicht in Holzbauweise ausgeführt werden. Als Außenwand sind diese jedoch nur ab einem Abstand von $< 2,50 \text{ m}$ zur Grundstücksgrenze erforderlich, ein Sonderfall, der hier nicht betrachtet werden soll.

CO₂-Berechnung

- Nachdem die Wände mit den o. g. Anforderungen bemessen und die Wandaufbauten festgelegt wurden, wurde eine CO₂-Berechnung durchgeführt.
- Materialien mit Mindermengen wie Dünnbettmörtel, luft- und dampfdichte Schichten, PE-Folien, etc. sind in die CO₂-Bilanz nicht explizit bzw. massenmäßig eingeflossen, sondern

wurden durch einen pauschalen Aufschlag von 5 % auf die Gesamtemissionen berücksichtigt.

- Bei der Berechnung wurde von einer Nutzungsdauer von 100 Jahren ausgegangen.
- Die CO₂-Emissionen wurden jeweils getrennt nach der Phase A sowie über alle Phasen A bis D (hier in kgCO₂/m²) ausgewertet und analysiert.

5.6.2 Ergebnisse der Bemessung und CO₂-Berechnung

Bei der Betrachtung der Außenwände wurden unterschiedliche Bauweisen mit verschiedenen gängigen Baustoffen untersucht, darunter Stahlbeton, Mauerwerksziegel, Kalksandstein, Porenbeton sowie Holzbauweisen. Um vorab einen Überblick über die CO₂-Werte der einzelnen Baustoffe zu geben, wurde diese im Hinblick auf die CO₂-Bilanz in Bild 5.8 vergleichend gegenübergestellt. Hier wurde für jeweils einen Kubikmeter der Baustoffe die CO₂-Bilanz in der Herstellungsphase (A1-A3) bzw. über die gesamte Lebensdauer vergleichend dargestellt.

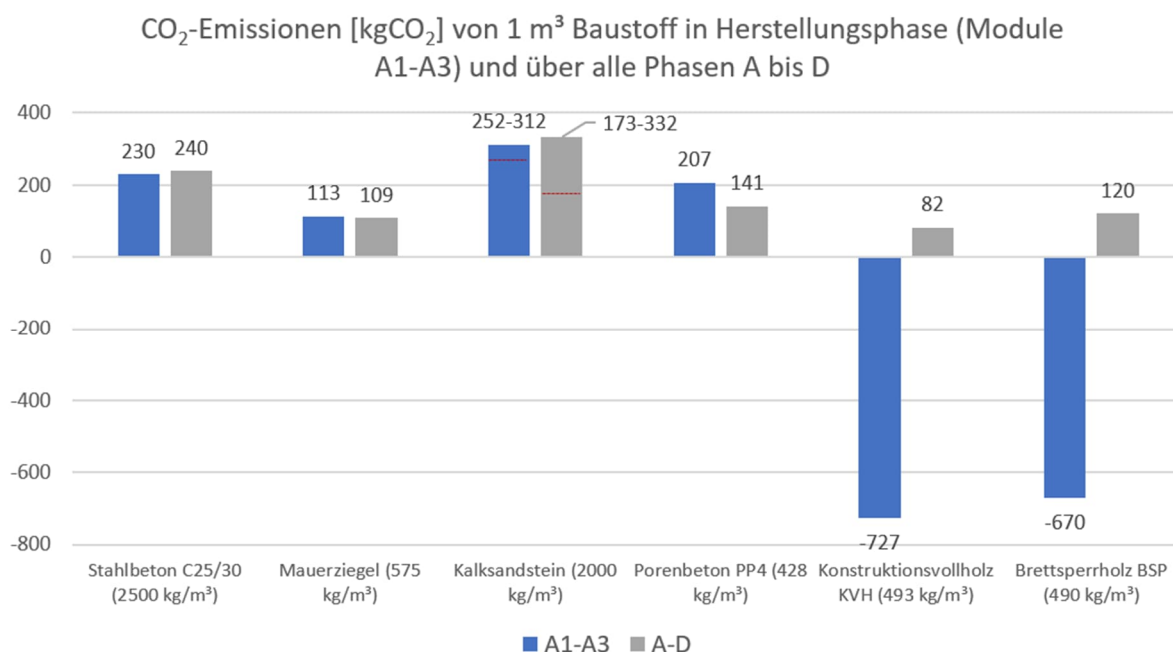


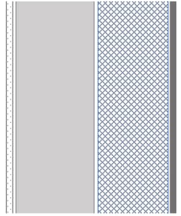
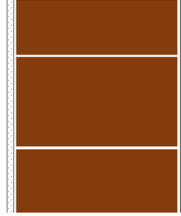
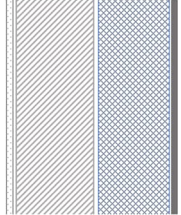
Bild 5.8 CO₂-Emission typischer Baustoffe für Außenwände

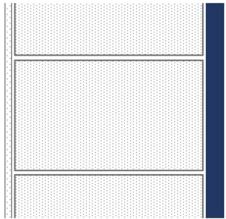
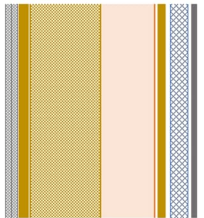
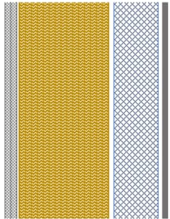
Für Kalksandstein mit einer Rohdichte von 2000 kg/m³ stehen derzeit in der ÖKOBAUDAT-Plattform zwei Datensätze für die CO₂-Bilanzierung zur Verfügung:

- Datensatz 1 (Generic Dataset) [38]:
Herstellungsphase (Module A1-A3): 312 kgCO₂/m³.
Gesamtemissionen über alle Lebenszyklusphasen (Module A-D), ohne Berücksichtigung des Decarbonatisierungsprozesses von Kalksandstein: 332 kgCO₂/m³.
- Datensatz 2 (Average Dataset, bereitgestellt vom Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.) [39]:
Nach Umrechnung auf eine Rohdichte von 2000 kg/m³ beträgt die Emission in der Herstellungsphase (Module A1-A3) 252 kgCO₂/m³.
Unter Berücksichtigung des Decarbonatisierungsprozesses (ca. -95 kgCO₂/m³), der Modul B1 (Nutzungsphase) zugeordnet ist, ergeben sich Gesamtemissionen über alle Phasen A-D in Höhe von 173 kgCO₂/m³.

Für die CO₂-Bilanzierung in diesem Abschnitt wurde Datensatz 2 verwendet.

Tabelle 9 Übersicht der untersuchten Außenwandsysteme in typischen Büro- und Wohngebäuden

| Nr. | Schemadetail der Außenwand | Lichte Höhe [m] | Wand Dicke [cm] | Tragende Konstruktion | Schichtenaufbau (von innen bis außen; nur relevante Komponente) | Besonderheit |
|-----|--|-----------------|-----------------|---|---|--|
| W1 | <p>Stahlbetonwand</p>  | 3,0 | 38,5 | <p>Beton C25/30, d = 18 cm</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bewehrungsmenge: 80 kg/m³ - Rohdichte Stb.-Wand: 2500 kg/m³ | <p>Innen: - 1,5 cm Kalkgipsputz</p> <p>Außen: - 1,0 cm Armierungsmörtel - 16 cm Außendämmung MW WLG 035 - 0,5 cm Armierungsmörtel - 1,5 cm Kalkzementputz</p> | Ortbeton, bzw. Fertigteil / Halbfertigteil |
| W2 | <p>Hochlochziegel mit Mineralwollefüllung</p>  | 3,0 | 40 | <p>Planhochlochziegel, gefüllt mit Mineralwolle, d = 36,5 cm</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mörtel: Dünnbettmörtel DM - Druckfestigkeitsklasse: 10 - char. Mauerwerksdruckfestigkeit: $f_k = 4,5 \text{ MN/m}^2$ - Rohdichteklasse: 0,75 (ca. 750 kg/m³) - Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 0,08 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ | <p>Innen - 1,5 cm Kalkgipsputz</p> <p>Außen: - 2,0 cm Leichtputz / Wärmedämmputz</p> | Bsp. Produkt: Poroton-S8-36,5-MW Monolithische Bauweise |
| W3 | <p>Kalksandstein</p>  | 3,0 | 38 | <p>Kalksandstein Planelement, d = 17,5 cm</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mörtel: Dünnbettmörtel DM - Mittlere Steindruckfestigkeit: 25 N/mm² - char. Mauerwerksdruckfestigkeit: $f_k = 12,9 \text{ MN/m}^2$ - Rohdichteklasse: 2,0 (Dichte ca. 1800 bis 2000 kg/m³) - Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 0,99 \text{ bis } 1,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ | Wie W1 | Bsp. Produkt: KS XL-PE SKF 20 – RDK 2,0 / DM |

| | | | | | | |
|-----|---|-----|------|--|---|--|
| W4 | <p>Porenbetonplansteine unbewehrt</p>  | 3,0 | 48 | <p>Porenbeton Planelement, d = 42,5 cm</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mörtel: Dünnbettmörtel DM - Mittlere Steindruckfestigkeit: 5,0 N/mm² - char. Mauerwerksdruckfestigkeit: $f_k = 2,6$ MN/m² - Rohdichte: 600 kg/m³ - Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 0,08$ bis 0,12 W/m·K | <p>Innen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1,5 cm Leichtputz ($\lambda \leq 0,09$ W/m·K) <p>Außen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 4,0 cm Leichtputz / Wärmedämmputz | <p>Bsp. Produkt: Porenbeton Planelement PPE / Planstein PPS SKF 4 – RDK 0,5 / DM</p> <p>Monolithische Bauweise</p> |
| W5a | <p>Holztafelbau – Konstruktionsvollholz KVH</p>  | 3,0 | 40 | <p>Sparren bzw. Holzständer aus Konstruktionsvollholz (KVH)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Querschnitt b/h = 8/28cm – Achsabstand ≤ 625 mm - Rohdichte KVH: ca. 600 kg/m³ - Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 0,13$ W/m·K | <p>Innen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2 x 12,5 mm GKF - 2,0 cm OSB-Platte <p>Zwischen Holzständer:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 16 cm Dämmung aus Zellulose Platte, $\lambda = 0,040$ W/m·K <p>Außen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1,5 cm OSB-Platte - 4 cm Außendämmung MW WLG 035, $s' = 15$ MN/m³ - 0,5 cm Armierungsmörtel - 1,5 cm Kalkzementputz | <p>Brandschutz:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Holztragkonstruktionen mit brandschutzwirksamer Bekleidung in der Gebäudeklasse 4 zulässig (regional abhängig). - Brandschutz durch Gipskarton-Feuerschutzplatten (GKF); Abweichungen zwischen Herstellerangaben und Laborergebnissen beachten. |
| W5b | <p>Massivholzbau – Brettsperrholz BSP</p>  | 3,0 | 34,5 | <p>Brettsperrholz (BSP), d = 20 cm</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rohdichte BSP: ca. 480 kg/m³ - Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 0,14$ W/m·K | <p>Innen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2 x 12,5 mm GKF <p>Außen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 10 cm Außendämmung MW WLG 035 - 0,5 cm Armierungsmörtel - 1,5 cm Kalkzementputz | <p>Wie W5a</p> |

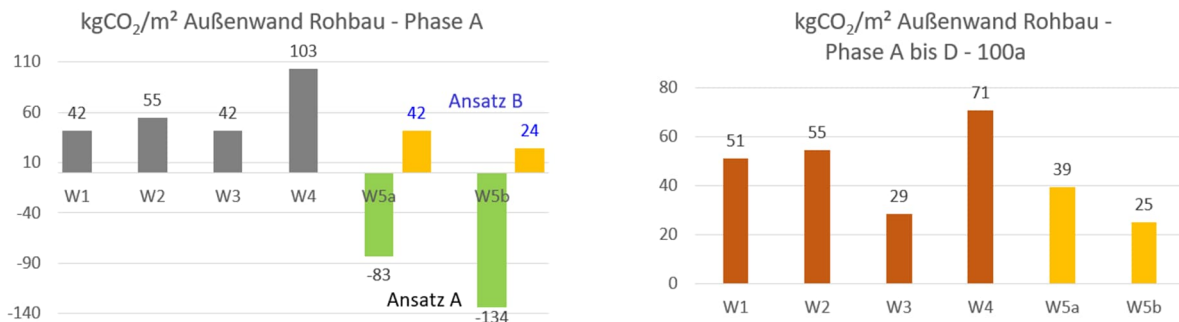
Die Bemessung der Außenwandtypen erfolgte unter Berücksichtigung der im Abschnitt 5.6.1 definierten Randbedingungen. Die resultierenden Abmessungen sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Die CO₂-Berechnungen der Wandsysteme werden in Tabelle 10 und Bild 5.9 veranschaulicht.

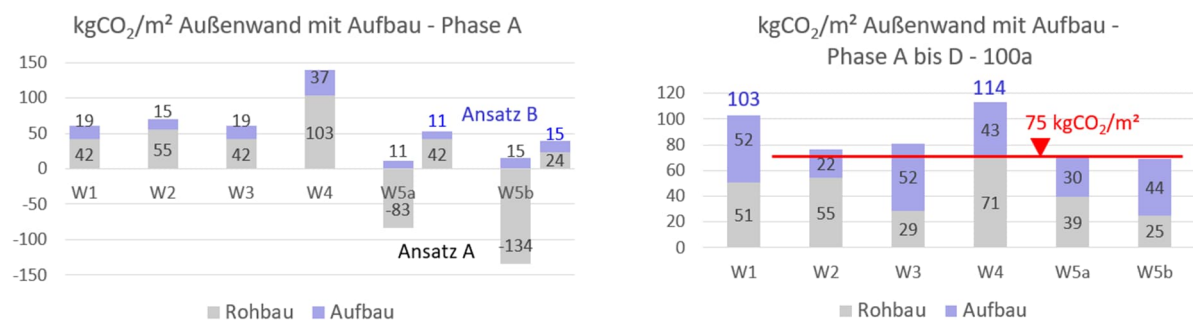
Tabelle 10 Übersicht der CO₂-Emissionen des Rohbaus, des Aufbaus sowie Gesamtemission der betrachteten Wandsysteme

| Var | Beschreibung - Wanddicke | Rohbau | | Aufbau | | Gesamt | |
|-----|---|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
| | | kgCO ₂ /m ² | | kgCO ₂ /m ² | | kgCO ₂ /m ² | |
| | | A1-A5 | A-D (100a) | A1-A5 | A-D (100a) | A1-A5 | A-D (100a) |
| W1 | Stahlbeton Halbfertigteil - 38,5 cm | 42 | 51 | 19 | 52 | 61 | 103 |
| W2 | Hochlochziegel mit Mineralwollefüllung (Poroton) - DM - 40 cm | 55 | 55 | 15 | 22 | 71 | 76 |
| W3 | Kalksandstein - DM - 38 cm | 42 | 29 | 19 | 52 | 61 | 81 |
| W4 | Porenbeton - DM - 42,5 cm | 103 | 71 | 37 | 43 | 139 | 113 |
| W5a | Holztafelbau KVH - 40 cm | -83 | 39 | 11 | 30 | -72 | 70 |
| W5b | Massivholzbau BSP - 34,5 cm | -134 | 25 | 15 | 44 | -118 | 69 |

(a) CO₂-Emissionen [kgCO₂/m²] der Außenwand in Rohbau in Phase A (Module A1-A5) (links) und über alle Phasen A bis D (rechts)



(b) CO₂-Emissionen [kgCO₂/m²] des Gesamtwandaufbaus in Phase A (Module A1-A5) (links) und über alle Phasen A bis D (rechts)



(c) CO₂-Emissionen [kgCO₂/m²] des Gesamtwandaufbaus in einer Zusammenstellung (* hier wurden in Phase A die CO₂-Emissionen von Holzbauteilen standardmäßig mit dem Ansatz A bilanziert)

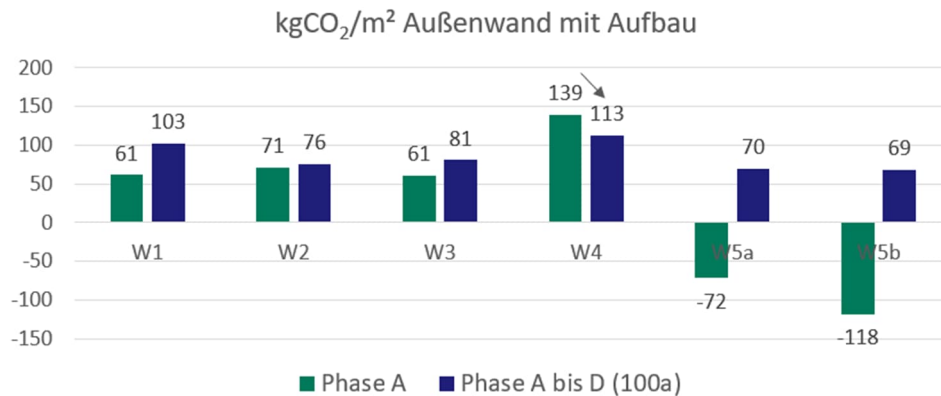


Bild 5.9 CO₂-Emissionen [kgCO₂/m² Wandfläche] der einzelnen untersuchten Außenwandsysteme bezogen auf die Herstellungsphase (Phase A) und den gesamten Lebenszyklus (Phase A bis D) über 100 Jahre, dargestellt für (a) Rohbau, (b) Wand mit Aufbau und (c) Übersicht der gesamten Außenwandsystem

Die Ergebnisse der durchgeführten Berechnung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Material

Im reinen Vergleich der in Bild 5.8 dargestellten Materialien zeigen Mauerziegel und Holzbaustoffe (KVH, BSP) mit ca. 100 kgCO₂/m³ über den gesamten Lebenszyklus die beste Baustoffe im Hinblick auf die CO₂-Bilanz. Stahlbeton weist hohe Emissionen auf, sowohl in der Herstellungsphase als auch über alle Phasen hinweg, mit 240 kgCO₂/m³.

Gemäß den aktuellen Vorgaben des Bundesverbands Kalksandsteinindustrie e.V. [39] kann für Kalksandstein sowie Porenbeton in der Nutzungsphase ein nenenswerter Anteil an Carbonatisierungseffekt angesetzt werden, da der Kalksandstein CO₂ aus der Umgebungsluft bindet. Über einen Zeitraum von etwa 50 Jahren kann es zu einer Reduktion von ca. 40 % der CO₂-Emission kommen, die während der Herstellung des Materials freigesetzt wurde. Auch wenn die Wand mit Putz, Anstrich oder ein Wäremdämmverbundsystem ausgestattet ist, wird dieser Effekt nur geringfügig eingeschränkt [40]. Aus diesem Grund sind die CO₂-Emissionen für die Phasen A-D etwa 30 % geringer (173 kgCO₂/m³ für Kalksandstein bzw. 141 kgCO₂/m³ für Porenbeton) als bei alleiniger Betrachtung der Herstellungsphase (252 kgCO₂/m³ für Kalksandstein bzw. 207 kgCO₂/m³ für Porenbeton).

Bei Beton tritt ebenfalls eine Recarbonatisierung auf, jedoch ist das CO₂-Speicherpotenzial deutlich geringer, mit lediglich etwa 10 % der CO₂-Emission, die bei der Herstellung des Betons emittiert wurde.

- Rohbau

Mit der entsprechenden Dimensionierung schwanken die Werte für die reine Rohbauwand in der Phase A (Herstellung und Einbau) zwischen 24 kgCO₂/m² Wandfläche für die Massivholzwand (W5b) und 103 kgCO₂/m² für die 42,5 cm cm starke Porenbetonwand (W4). Über die gesamte Lebensdauer verändert sich die Spannweite von ca. 25 kgCO₂/m² für die Massivholzwand auf 71 kgCO₂/m² für die Porenbetonwand. (Bild 5.9 a)

Neben der Massivholzwand schneidet auch die 17,5 cm starke Kalksandsteinwand (W3) über allen Phasen A bis D mit ca. 29 kgCO₂/m² sehr gut ab. Dies ist auf die CO₂-Speicherfähigkeit durch die Carbonatisierung, etwa -95 kg CO₂/m³ in der Nutzungsphase, zurückzuführen. Bei Ausführung als 24 cm starke Wand hätten sich entsprechend 40 kgCO₂/m² ergeben, dieses liegt ebenfalls im Bereich der Holzständerbauweise bzw. unterhalb der Ausführung in Stahlbeton. Ein direkter Vergleich mit der Porenbetonwand oder dem Mauerziegel ist an dieser Stelle allerdings

nur bedingt möglich, da bei der 42,5 cm starken Porenbetonwand und dem 36,5 cm starken mit Mineralwolle gefüllten Hochlochziegel die Wärmedämmfunktion integriert ist.

▪ **Gesamtwandaufbau**

Bei der Betrachtung des Gesamtwandaufbaus schwanken die Werte zwischen ca. 70 kgCO₂/m² für die Holzbauweisen bis ca. 114 kgCO₂/m² für die Porenbetonwand. (Bild 5.9 b)

Die Porenbetonwand ohne zusätzliche Wärmedämmung schneidet nach dieser Berechnung im Hinblick auf die CO₂-Bilanz schlecht ab. Grund ist einerseits die erforderliche Wandstärke von 42,5 cm, die erforderlich ist, die statischen und vor allem wärmedämmtechnischen Anforderungen zu erfüllen, darüber hinaus lässt sich der erforderliche U-Wert auch lediglich durch einen ca. 4 cm starken Leicht- bzw. Wärmedämmputz erreichen. Dieser Außenputz weist einen hohen CO₂-Wert von ca. 3 kgCO₂/m² je cm auf und muss etwa alle 40 Jahre ausgetauscht werden, was zusätzliche CO₂-Emissionen mit sich bringt. Der Putz trägt dabei allein etwa 30 % der gesamten CO₂-Emission des Wandsystems bei.

In diesem Zusammenhang stellt der mit Mineralwolle gefüllte Hochlochziegel mit 81 kgCO₂/m² die beste Variante dar (Bild 5.9 c). Zwar liegt der Wert leicht über dem der Holzbauweisen, jedoch erfordert die monolithische Bauweise keinen zusätzlichen Austausch oder Instandsetzungsaufwand von Aufbauschichten (insbesondere der Außendämmung), wodurch die CO₂-Emissionen reduziert werden.

- Zu beachten ist, dass der Anteil der CO₂-Emission des Rohbaus in der Phase A bei etwa 70 % liegt, über alle Phasen A-D allerdings lediglich bei 50 %. Grund hierfür ist, dass gemäß Tabelle 3, Abschnitt 3.2.2 davon ausgegangen wurde, dass der gesamte Wandaufbau über die angenommene Lebensdauer von 50 Jahren zumindest einmal erneuert werden muss.

Die Fassadenbekleidung von Außenwänden dient nicht nur dem Wetterschutz, sondern prägt auch das Erscheinungsbild und die Merkmale eines Gebäudes. Je nach gestalterischen Anforderungen können unterschiedliche Fassadensysteme und Materialien verwendet werden, wie zum Beispiel einfache Putzfassaden auf Dämmung mit Dispersionsanstrich, die stabile Klinker-Vorsatzschale als bewährter Wetterschutz in Küstenregionen oder moderne vorgehängte hinterlüftete Fassaden aus Holz oder Metall.

In Tabelle 11 wird die CO₂-Bilanz exemplarischer Wandsysteme mit typischen Varianten der Fassadenbekleidung dargestellt.

Tabelle 11 CO₂-Bilanzierung von Wandsystemen mit unterschiedlichen Fassadenbekleidungen

| Variante / CO ₂ -Bilanz pro [m ²] Wandfläche | CO ₂ -Bilanz 1xHerst. (A-D) | Lebens- dauer | CO ₂ -Bilanz 100a (A-D) |
|---|---|------------------|---------------------------------------|
| | [kgCO ₂ /m ²] | [Jahre] | [kgCO ₂ /m ²] |
| A) Kalksandstein mit Putzfassade | | | |
| 1,5 cm Kalkgipsputz (innen) | 100 | 3,2 | 3,2 |
| 17,5 cm Kalksandstein | 100 | 27 | 27 |
| 1,0 cm Armierungsmörtel | 40 | 8 | 8 |
| 16,0 cm Wärmedämmung EPS | 40 | 19 | 57 |
| 0,5 cm Armierungsmörtel | 40 | 4 | 12 |
| 0,5 cm Kunstharzputz | 40 | 12 | 36 |
| 0,03 cm Anstrich Dispersionsfarbe | 10 | 0,7 | 7 |
| Sonstiges (Pauschal) | 40 | 2 | 6 |
| Summe | | 75,9 | 156,2 |

| | | | |
|---|-----|-------------|-------------|
| | | | |
| B) Kalksandstein mit Klinkerfassade | | | |
| 1,5 cm Kalkgipsputz (innen) | 100 | 3,2 | 3,2 |
| 17,5 cm Kalksandstein | 100 | 27 | 27 |
| 1,0 cm Armierungsmörtel | 100 | 8 | 8 |
| 16,0 cm Wärmedämmung MiWo | 100 | 11 | 11 |
| 11,5 cm Klinker-Vormauerziegel | 100 | 30 | 30 |
| Mörtel für Vormauerziegel | 100 | 3,5 | 3,5 |
| Befestigungssystem | 100 | 0,5 | 0,5 |
| Sonstiges (Pauschal) | 100 | 2 | 2 |
| Summe | | 85,2 | 85,2 |
| C) Holztafelbau mit Holzverschalung | | | |
| 2 x 1,25 cm GFK-Platte | 100 | 3,5 | 3,5 |
| Holztafelbau mit 16 cm Zelluloseplatten zwischen den Holzständern | 100 | 38 | 38 |
| 1,0 cm Armierungsmörtel | 50 | 8 | 16 |
| 4,0 cm Mineralwolle | 50 | 6 | 12 |
| 2 cm Holzverschalung aus Weißtanne | 50 | 3,5 | 7 |
| Hinterlüftete Fassade - Befestigung | 50 | 0,5 | 1 |
| Sonstiges (Pauschal) | 50 | 2 | 4 |
| Summe | | 61,5 | 81,5 |

5.7 Untersuchung hinsichtlich verschiedenen Estricharten

5.7.1 Auswahl der Systeme und Dimensionierung

Die Ergebnisse der Untersuchung in Abschnitt 4.2.6 zeigen, dass der Anteil der Deckenaufbauten (Estrich sowie Trittschalldämmung und ggf. Abdichtung und Dämmung) über die Lebensdauer einen Anteil von ca. 16 % an der gesamten „grauen Emission“ hat und hiervon zwischen 70 % und 85 % auf den Estrich entfällt. Hiermit ist der Anteil des Estrichs an der gesamten CO₂-Emission höher als der Anteil der Gebäudehülle (Außendämmung und Fassadenverkleidung) bzw. der Fenster, die jeweils bei ca. 11 % liegen (Bild 4.14). Im Zuge der Berechnung wurde gemäß Tabelle 3, Abschnitt 3.2.2 davon ausgegangen, dass der Estrich zumindest einmal in der 100-jährigen Lebensdauer des Gebäudes ausgetauscht wird.

Aufgrund der hohen Relevanz des Estrichs werden im folgenden unterschiedliche Systeme miteinander verglichen bzw. versucht, welche Systeme im Hinblick auf die CO₂-Bilanz optimal sind.

Zur der Auswahl und Dimensionierung des Estrichs sind zunächst die folgenden Funktionen zusammengestellt:

- Ausgleich eventueller Unebenheiten,
- Lastverteilung aus hohen lokalen Einzellasten,
- Schutz der Heizungsrohe einer Fußbodenheizung,
- Verbesserung der Trittschalldämmung (z.B. im Falle des schwimmenden Estrichs)

Hieraus ergeben sich die folgenden zentralen Eigenschaften:

- Druckfestigkeit C
- Biegezugfestigkeit F
- Verschleißwiderstand A, sofern eine direkte Nutzung des Estrichs vorgesehen ist.

Die Dicke des Estrichs, die entsprechend linear in die CO₂-Emission eingeht, hängt im wesentlichen von der Lasteiwirkung (lediglich Flächenlast oder nennenswerte Einzellast), von den Festigkeitseigenschaften und der Tatsache ab, ob Rohre einer Fußbodenheizung im Estrich verlegt werden sollen. Die DIN 18560-4 enthält Empfehlungen für Estrichdicken unterschiedlicher Estricharten bei unterschiedlichen Flächen- bzw. Einzellasten.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchung sind verschiedene Estrich-Arten für eine Anwendung als schwimmender Estrich in einem Wohn- und Verwaltungs- bzw. Bürogebäude mit Fußbodenheizung verglichen worden. Hierbei sind vergleichend sowohl ein konventioneller Zementstrich, als auch eher neuartige Systeme betrachtet worden. Im einzelnen wurden die folgenden Systeme untersucht, die im folgenden kurz zusammenfassend beschrieben sind:

- (Nass-) Zementstrich:

Gemisch aus Zement, Sand, Wasser und ggf. ergänzenden Zusatzmitteln. Zeichnet sich durch hohe Festigkeit und Verschleißwiderstand aus, darüber hinaus unempfindlich gegen Feuchtigkeit. Ist die Standardvariante im Wohnungsbau.

- (Nass-) Calciumsulfat-Estrich

Gemisch aus Calciumsulfat (= gebrannter Gips), Sand, Wasser und ggf. ergänzenden Zusatzmitteln. Ist im Vergleich zum Zementstrich leichter verarbeitbar (Auftragen bzw. Abziehen), außerdem bessere Wärmeleitfähigkeit, daher im Fall einer Fußbodenheizung sehr gut geeignet.

Da er allerdings feuchtigkeitsempfindlich ist, ist er nicht für Feuchträume oder den Außenbereich geeignet. Nachteilig ist ebenfalls eine vergleichsweise lange Trocknungszeit von ca. 1 mm pro Tag (für die ersten 40 mm, danach langsamer).

- (Nass-) Gussasphaltestrich

Gemisch aus Bitumen, Sand, Splitt und Steinmehl. Weist auch gegenüber Zementstrich eine um ca. 20-40 % höhere Festigkeit auf, kann daher entsprechend dünner ausgeführt werden.

Sehr geringe Trocknungszeiten, feuchtigkeitsunempfindlich, Nachteilig allerdings die aufwendige Herstellung bei Verarbeitungstemperaturen von 220 – 250 °C, Anwendung daher vornehmlich im Bereich von Garagen, Industriegebäude o.ä., wo die hohe Festigkeit bzw. der Widerstand gegen Feuchtigkeit besonders relevant sind.

- Trockenestrich – Gipskartonplatte auf gebundene Schüttung

Trocken und meist schwimmend auf Mineralfaser- oder Hartschaumstoffschüttungen verlegte vorgefertigte Platten aus Gipskarton, Holzwerkstoffen oder Holzspanplatten. Als Schüttungen kommen Trockenschüttungen (z.B. lose, feinkörniges Granulat) oder gebundene Schüttungen (z. B. Dämmstoffkörner und aushärtende Komponenten auf Zementbasis oder Epoxidharz) zum Einsatz. Wie das folgende Beispiel zeigt, kann die Art der Schüttung die CO₂-Bilanz deutlich beeinflussen:

- 1 m³ Schüttung aus Polystyrolschaumstoffpartikeln: über alle Phasen A-D ca. 85 kgCO₂/m³
- 1 m³ Schüttung aus EPS mit Zement-Bindemittel: über alle Phasen A-D ca. 209 kgCO₂/m³

Zur Anwendung kommen im Regelfall gebundene Schüttungen, da diese eine hohe Festigkeit und Feuchtebeständigkeit aufweisen.

Da allerdings die Gipskartonplatten oder Gipsfaserplatten feuchtigkeitsempfindlich sind, ist die Anwendung nicht für Nassräume wie Badezimmer oder Küche geeignet.

Eine Integration von Heizungsrohren für eine Fußbodenheizung ist möglich, wobei zur Verbesserung der eher mittelmäßigen Leitfähigkeit meist ergänzende Wärmeleitbleche aus verzinktem Stahl eingelegt werden.

- Trockenestrich – Gipskartonplatte auf lose Holzspänen CEMWOOD

- 1 m³ Schüttung aus Holzspäne CEMWOOD: über alle Phasen A-D ca. -188 kgCO₂/m³ [41].

Laut dem Produkthersteller wird das Produkt nach dem Abbau des Trockenestrichsystems zu 100 % wiederverwendet, wobei das im Holz gespeicherte CO₂ langfristig gebunden bleibt. Dadurch ergibt sich im Modul C3 (Abfallbehandlung) ein GWP-Wert von 0 kg CO₂/m³. Über alle Phasen hinweg weist das Produkt daher einen negativen CO₂-Wert auf.

- (Nass-) Lehmeestrich / Stampflehm

Stampflehm besteht aus ungebranntem Lehm, der mit Zuschlagstoffen wie Sand, Kies, eventuell Stroh gemischt wird. Im Regelfall besteht der Estrich aus einer 6 cm starken Schicht mit gröberer Körnung und einer ca. 4 cm starken Deckschicht mit einem Größtkorn von maximal 8 mm, um eine glatte Oberfläche zu realisieren.

Die Festigkeiten sind deutlich geringer als bei Zementstrich, reichen jedoch bei Wohnräumen, bei denen keine hohen Punktlasten auftreten, im Regelfall aus.

Nachteilig sind die langen Trocknungszeiten (bei einer üblichen Estrichstärke von 10 cm i.d.R. 5-8 Wochen) sowie die Feuchtigkeitsempfindlichkeit, so dass ein Einsatz in Räumen mit hoher Luftfeuchtigkeit wie Bad ungeeignet ist.

Für die o. g. Systeme wurde eine entsprechende CO₂-Bilanzierung durchgeführt. Hierbei waren die folgende Punkte zu beachten:

- Die CO₂-Einheitswerte können im Wesentlichen der ÖKOBAUDAT entnommen werden.
- Die in der ÖKOBAUDAT angegebenen Baustoffe für Zementestrich und Calciumsulfat-Estrich beziehen sich allerdings auf die Trockenform. Um die CO₂-Bilanz für die Ausführung als Nassestrich zu berechnen, muss die erforderliche Menge an Trockenmittel pro m² ermittelt. Dies erfolgt durch eine Umrechnung, wie viel Liter oder Kilogramm Nassestrich aus 1 kg des gelieferten Trockenmaterials entstehen können. Diese Umrechnung wurde vereinfacht mit einem mittleren Umrechnungsfaktor von 0,85 für Zementestrich bzw. 0,9 für Calciumsulfat-Estrich durchgeführt.
- Bezüglich der Lebensdauer wurde i.a. von 50 Jahren ausgegangen, so dass die Schicht bei einer angenommenen Nutzungsdauer des Gebäudes einmal zu ersetzen ist. Lediglich für die Trockenestrich-Variante mit Holzspänenschüttung wurde eine kürzeren Nutzungsdauer von 20 Jahren zugrunde gelegt, aufgrund der Feuchtigkeitsempfindlichkeit der Holzspäne.

5.7.2 Ergebnisse der Untersuchung

Die Ergebnisse der CO₂-Berechnung sind in der folgenden Tabelle 12 dargestellt. Als wesentliche Erkenntnisse lässt sich hierbei folgendes festhalten:

- Die verschiedenen Systeme unterscheiden sich in der CO₂-Bilanz sehr deutlich. Dieses ist im wesentlichen auf die bereits hohen Unterschiede der CO₂-emission der einzelnen Baustoffe zurück zu führen.
- Den mit Abstand höchsten Wert weist der praxisübliche Zementestrich mit ca. 25,1 kgCO₂/m² in der Einmalherstellung bzw. ca. 50 kgCO₂/m² über die 100-jährige Lebensdauer des Bauwerks auf. Der Wert liegt damit oberhalb der Werte typischer Rohbaudecken.
- Letztlich weisen alle andere System deutlich geringere CO₂-Kennwerte auf. Die günstigste Variante ist der Trockenestrich, der auf einer Schüttung aus Holzspänen verlegt wird, hier wird in Summe sogar ein CO₂-Abzugswert ausgewiesen. Dieses ist darin begründet, dass die Holzspänen einen negativen CO₂-Wert verfügen, bedingt durch ihre Wiederverwendbarkeit.
Auch der Lehmestrich weist mit ca. 5,2 kgCO₂/m³ lediglich ca. 10 % der CO₂-Werte des Zementestrichs aus, die Größenordnung ist im Vergleich zu den CO₂-Werten der Rohbaudecke von untergeordneter Bedeutung.
- Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass beim Estrich durchaus viel Einsparpotential im Hinblick auf die CO₂-Bilanz besteht und dieses auch in einer Größenordnung, die bezogen auf die gesamte "graue Emission" des Gebäudes durchaus relevant ist. Zu beachten ist allerdings, dass nicht jedes System in allen Bereich einsetzbar ist. In Feuchträumen scheiden z.B. die Trockenestrich- oder Lehmestrichvarianten aus.

Tabelle 12 CO₂-Bilanzierung verschiedener Estricharten

| Estrichart | übliche Dicke *) ohne Dämmschicht | Gewicht | Biegezugfestigkeit | Druckfestigkeit | Lebensdauer | CO ₂ -Bilanz 1x Herst. (A-D) | CO ₂ -Bilanz 100a (A-D) | CO ₂ -Bilanz 100a (A-D) je cm Dicke |
|---|---|----------------------|----------------------|----------------------|-------------|---|---------------------------------------|--|
| | [cm] | [kg/m ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [Jahre] | [kgCO ₂ /m ²] | [kgCO ₂ /m ²] | [kgCO ₂ /m ² je cm] |
| (Nass) Zementestrich Rohdichte 2400 kg/m ³ | 6,0 | 123,0 | 4 bis 7/8 | 20-30 / 35-50 | 50 | 25,1 | 50 | 8,5 |
| (Nass) Calciumsulfat-Estrich Rohdichte 2000 kg/m ³ | 6,0 | 108,0 | 4-6/ bzw. 7 | 20-40 / bis 50 | 50 | 14,9 | 30 | 5 |
| (Nass) Gussasphaltestrich Rohdichte 2400 kg/m ³ | 4,0 | 96,0 | 5 bis 10 | 20-40 | 50 | 20,5 | 41 | 10 |
| Trockenestrich mit gebundener Schüttung 2 x 12,5 mm Gipskartonplatte auf 4 cm gebundene Schüttung (350 kg/m ³), mit Flächenheizung (zusätzlich verzinkte Wärmeleitbleche 0,4 mm, ca. 3,2 kg/m ² und 10 mm Gipskartonplatte auf der Schüttung als Lastverteilung) | 7,0 | 40,0 | 4-7/ 3-4 | 20-30 | 50 | 13,3 | 27 | - |
| Trockenestrich mit Trockenschüttungen 2 x 12,5 mm Gipskartonplatte auf 6 cm Schüttung aus Holzspänen (320 kg/m ³), mit Flächenheizung (zusätzlich verzinkte Wärmeleitbleche 0,4 mm, ca. 3,2 kg/m ² und 10 mm Gipskartonplatte auf der Schüttung als Lastverteilung) | 8,0 | 40,0 | - | 8,2 | 20 | -3,3 | -16 | - |
| (Nass) Lehm Estrich / Stampflehm | 10,0 | 200,0 | 1 bis 2 | 2 bis 5 | 50 | 2,6 | 5,2 | 0,5 |

5.8 Untersuchungen zu Bodenbelägen

Überraschenderweise wurde in der CO₂-Bilanz in Abschnitt 4 festgestellt, dass auch die Bodenbeläge mit im Mittel ca. 9 % einen vergleichsweise hohen Anteil an der CO₂-Bilanz aufweisen. Einerseits weisen viele hier verwendete Materialien wie Teppich, PVC, etc. einen hohen CO₂-Einheitswert auf, so dass selbst kleine Mengen einen hohen Einfluss haben, andererseits weisen viele Bodenbeläge im Vergleich zur Rohbaukonstruktion eine deutlich geringere Nutzungsdauer auf, so dass diese innerhalb der Lebensdauer mehrfach ersetzt werden müssen.

Da bei den Bodenbelägen neben funktionalen Anforderungen (Nassbereich oder Wohnbereich, ...) auch gestalterische Aspekte eine Rolle spielen, ist hier die Anzahl der Möglichkeiten bzw. Materialien sehr hoch und damit auch die Spannweite der CO₂-Einheitswerte deutlich größer als bei den anderen Bauteilen.

In Tabelle 13 sind die CO₂-Emissionen je Quadratmeter für verschiedene Bodenbeläge zusammengestellt, hierbei sind sowohl die Werte für die Einmalherstellung als auch die aus der ungefähren Nutzungsdauer ermittelte Gesamtemission für eine Lebensdauer des Bauwerks von 100 Jahren ermittelt worden. Die angegebenen Werte berücksichtigen nicht den CO₂-Anteil von detaillierten Komponenten wie Abdichtungslagen oder Klebstoffen.

Tabelle 13 CO₂-Bilanzierung verschiedener Bodenbeläge

| Bodenbelag | Dicke | Maße | Lebensdauer | CO ₂ -Bilanz 1xHerst. (A-D) | CO ₂ -Bilanz 100a (A-D) |
|---------------------|-------|----------------------|-------------|--|--------------------------------------|
| | [cm] | [kg/m ²] | [Jahre] | [kgCO ₂ /m ²] | [kgCO ₂ /m ²] |
| Textil - Nadelvlies | | 1,35 | 10 | 12,4 | 124 |
| Kautschuk - Belag | 0,2 | 3,36 | 30 | 8,5 | 34 |
| PVC - Belag | 0,2 | 3,3 | 20 | 14,5 | 73 |
| Holz - Laminat | 0,9 | 7,5 | 20 | 8,8 | 44 |
| HDF - Vinylboden | 0,9 | 8,7 | 20 | 10,9 | 54 |
| Massivholzparkett | 1,8 | 11,7 | 50 | 7,1 | 14 |
| Keramikplatte | 1,0 | 21 | 50 | 16,0 | 32 |
| Zementmörtelbett | 2,0 | 36 | 50 | 9,0 | 18 |
| Summe | | | | | 50 |
| Natursteinplatte | 2,0 | 52 | 100 | 21,4 | 21 |
| Zementmörtelbett | 2,0 | 36 | 100 | 9,0 | 9 |
| Summe | | | | | 30 |

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es wird deutlich, dass der CO₂-Bedarf von Bodenbelägen eine sehr große Spannweite aufweist. Der Unterschied zwischen dem Belag mit der geringsten CO₂-Emission von ca. 14 kgCO₂/m² für ein 1,8 cm starkes Massivholzparkett und dem höchsten Wert von 124 für einen textilen Teppich liegt bei einem Faktor 9.
- Vor dem Hintergrund, dass die CO₂-Emission einer Stahlbeton-Rohbaudecke bei etwa 70 kgCO₂/m² liegt (siehe Abschnitt 5.5) ist ein Wert von ca. 14 kgCO₂/m² für einen Bodenbelag aus Massivholzparkett im Hinblick auf die Gesamtbilanz gering ist; Werte für Teppich von ca. 124 kgCO₂/m² oder PVC-Belag von ca. 73 kgCO₂/m² überschreiten über die Lebensdauer den CO₂-Bedarf für die Stahlbetondecke sogar.
- Besonders kritisch sind Beläge, die einerseits eine hohe CO₂-Emission in der Herstellung aufweisen und darüber hinaus in vergleichsweise kurzer Zeit verschlissen sind.
- Im Hinblick auf einen hohen CO₂-Anteil in der Herstellung sind sowohl Keramikplatte und Natursteinplatte zu nennen. Da bei den beiden Steinen jedoch langlebig sind, relativiert

sich die CO₂-Emission über die Lebensdauer. Demgegenüber weisen textile Bodenbeläge oder aber auch PVC oder Laminat eine deutlich geringere Lebensdauer auf, so dass diese über die Nutzungsdauer des Bauwerks mehrfach ausgetauscht werden müssen und daher in Summe für die gesamte „graue Emission“ durchaus von Bedeutung sind.

Die o. g. Auswertung zeigt, dass unter CO₂-Aspekten auch Bodenbeläge einen großen Einfluss haben und durchaus ins Gewicht fallen. Daher sollten diese ebenfalls mit Bedacht ausgewählt werden, wobei der Fokus neben dem CO₂-Einheitswert auch auf der Nutzungsdauer liegen muss. Daher gilt es vor allem auch im Zuge von Nutzungsänderungen, die Fußbodenaufbauten mit Bedacht auszutauschen.

5.9 Untersuchungen zu Dämmstoffen für die Außendämmung

Abschließend sind noch entsprechende CO₂-Untersuchungen zu Dämmstoffen für die Außendämmung durchgeführt worden. Der Anteil an der gesamten „grauen Emission“ liegt gemäß Untersuchung in Abschnitt 4 bei ca. 6 %. Aufgrund der größeren Fläche und der damit verbundenen höheren Relevanz in Bezug auf die Gesamt-CO₂-Emission wurde die Untersuchung auf Dämmsysteme für Außenwände beschränkt, Systeme für Bodenplatten bzw. Dächer wurden an dieser Stelle nicht betrachtet.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung wurde folgende Dämmstoffe bzw. Herstellungsarten vergleichend untersucht:

- Synthetische Dämmstoffe wie XPS (Extrudiertes Polystyrol) und EPS (Expandiertes Polystyrol)
- Mineralische Dämmstoffe wie Mineralwolle, bestehend aus Glaswolle und/oder Steinwolle
- Organische Dämmstoffe, die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden, wie zum Beispiel Zellulose, Holzfaser, Kork und Hanffaser.

Zu den einzelnen Dämmstoffarten sind dann entsprechende Produkte mit ausreichender Druckfestigkeit und Witterungsbeständigkeit ausgewählt worden. Dieses sind einerseits konventionelle Dämmstoffe wie Mineralwolle (MW) und Polystyrol (EPS), zu den Naturprodukten wurden gemäß [42] (Tabelle 7.1) Holzfaser-Dämmplatten und Korkplatten ausgewählt. Im Einzelnen wurden die folgenden Produkte miteinander verglichen:

- Korkdämmplatte (expandiert) mit einer Rohdichte von 100 kg/m³, $\lambda = 0,040 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Holzfaserdämmplatte mit einer Rohdichte von 160 kg/m³, $\lambda = 0,042 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Mineralwolldämmplatte (50% aus Glaswolle und 50% aus Steinwolle) im mittleren Rohdichtebereich 60-120 / Rohdichte 100 kg/m³, $\lambda = 0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- EPS-Dämmplatte (Durchschnittlich): weiß / grau im Rohdichtebereich 15-20 kg/m³, $\lambda = 0,034 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Zur Dimensionierung bzw. zum Vergleich im Hinblick auf die CO₂-Bilanz wurde im Rahmen der durchgeführten Untersuchung wie folgt vorgegangen:

1. Es wurde das folgende Außenwandsystem generiert und
 - Innenputz: 1,5 cm Kalkgipsputz, $\lambda = 0,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
 - Rohbau: Mauerwerk aus 17,5 cm Kalksandstein Rohdichtklasse 2.0, $\lambda = 1,1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
 - Dicke Dämmschicht: Ermittlung in Schritt 2
 - Armierungsmörtel mit Oberputz – vereinfacht Außenputz: 1,5 cm Kalkzementputz, $\lambda = 0,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Ohne die Wärmedämmung ergibt sich hieraus der folgende U-Wert:

| | | | U-Wertberechnung | | |
|------------------|-------------|----------------|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|
| | | | (Wärmestrom horizontal gerichtet) | | |
| Bezeichnung | Schicht-Nr. | Baustoff | Lambda λ | Dicke s | Widerstand R |
| | | | [W/m ² ·K] | [m] | [m ² ·KW] |
| | | Rsi (innen) | | | 0,130 |
| Innenbekleidung | 1a | Kalkgipsputz | 0,900 | 0,015 | 0,017 |
| Tragkonstruktion | 2a | Kalksandstein | 1,100 | 0,175 | 0,159 |
| Dämmschicht | 3a | variiert | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Außenputz | 4a | Kalkzementputz | 0,900 | 0,015 | 0,017 |
| | | Rsa (außen) | | | 0,040 |
| | | | | U (W/m ² K) = | 2,759 |

2. Gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG) 2024 [37] (Tabelle in Anlage 7, Zeile 1a) ist für Außenwände ein U-Wert von 0,24 W/(m²·K) gefordert. Für die unterschiedlichen ausgewählten Dämmstoffe ist dann zurückgerechnet worden, welche Dämmstärken s [cm] erforderlich sind, so dass die Vorgabe an den U-Wert erfüllt ist. Hiermit ergaben sich die folgenden Werte:
 - EPS: s = 14 cm
 - Mineralwolle: s = 14 cm
 - Kork: s = 16 cm
 - Holzfaser: s = 18 cm

3. Mit den unter Schritt 2 ermittelten Dämmstärken kann dann eine CO₂-Berechnung für die unterschiedlichen Varianten durchgeführt werden. Hierbei wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:
 - Die EPD's für die einzelnen Produkte wurden der ÖKOBAUDAT entnommen,
 - Bei allen Produkten wurde die gleiche Nutzungsdauer von 50 Jahren angesetzt,
 - Im Modul D (Recyclingpotential) wurden die möglichen thermischen Rückgewinnungspotentiale nicht in Ansatz gebracht, weil die angegebenen Werte in der Zukunft / zum Zeitpunkt eines späteren Rückbaus (in ca. 50 Jahren) höchst fraglich sind.

Als Ergebnis ergibt sich, dass die organischen Dämmstoffe besser abschneiden als die synthetischen bzw. mineralischen. Vor allem die Dämmplatte aus Kork weist mit lediglich 10,4 kgCO₂/m² bei Einmalherstellung bzw. mit 21 kgCO₂/m² über die gesamte Lebensdauer die beste CO₂-Bilanz auf. Allerdings wird Kork als brennbarer Baustoff (B) eingestuft. Die übrigen Wärmedämmstoffe liegen mit etwa 35 kgCO₂/m² in einem vergleichbaren Bereich. (Tabelle 14)

Tabelle 14 CO₂-Bilanzierung verschiedener Außendämmstoffe

| Außendämmung | EHW CO ₂ (A1-A3) | EHW CO ₂ (A-D) | Rohdichte | λ *) | gew. Stärke s | CO ₂ -Bilanz 1xHerst. (A-D) | CO ₂ -Bilanz 100a (A-D) |
|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|---------|---------------|--|--------------------------------------|
| | [kgCO ₂ /m ³] | [kgCO ₂ /m ³] | [kg/m ³] | [W/m·K] | [cm] | [kgCO ₂ /m ²] | [kgCO ₂ /m ²] |
| expandierte Korkdämmplatte | -108,0 | 65,1 | 100 | 0,040 | 16 | 10,4 | 20,8 |
| Holzfaserdämmplatte | -174,0 | 92,8 | 160 | 0,042 | 18 | 16,7 | 33,4 |
| Mineralwoll dämmplatte | 120,8 | 138,0 | 100 | 0,035 | 14 | 19,3 | 38,6 |
| EPS-Hartschaum Dämmplatte | 60,5 | 120,7 | 15-20 | 0,034 | 14 | 16,9 | 33,8 |

*) Lambda: Wärmeleitfähigkeit - Bemessungswert

5.10 Zusammenfassung der CO₂-Optimierungsvorschläge und Abschätzung der möglichen Reduzierung

In diesem Abschnitt werden alle im Rahmen des Projektes erarbeiteten Optimierungsvorschläge nochmal zusammengestellt und das entsprechende CO₂-Einsparpotential abgeschätzt. Grundsätzlich sind hierbei zwei verschiedene Zielgrößen relevant, die zwar eng miteinander verbunden sind, aber doch unterschieden werden sollten:

a) CO₂-Emission für die Erstellung (Phase A) der Gebäude

Grundsätzlich werden Bauwerke für eine lange Lebensdauer von 80 -100 Jahren geplant und durch Umbaumaßnahmen und Erneuerungen fallen über die gesamte Lebensdauer CO₂-Emissionen an, die entsprechend ein zu beziehen sind (siehe unter b)).

Da die mit Abstand höchsten CO₂-Emissionen allerdings in der Phase A (Herstellung und Einbau) anfallen und auch gerade zum aktuellen Zeitpunkt immense Probleme mit einer viel zu hohen CO₂-Emission bestehen (sowie bei positiver Entwicklung wünschenswerterweise nicht mehr in 80 -100 Jahren), sollte ein zentraler Fokus auf der Reduzierung der CO₂-Emission liegen, die kurzfristig in der Phase A anfallen würde.

Basierend auf Vergleichsrechnungen an aktuellen Bauwerksplanungen wurden in Abschnitt 4 i. M. 350 kgCO₂/m² Nettoraumfläche (NRF) bzw. 90 kgCO₂/m³ Bruttorauminhalt (BRI) als mittlere CO₂-Emissionen ermittelt. Zielgrößen waren die in [1] ermittelten 32 kgCO₂/m³ BRI, die bei Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens als Obergrenze emittiert werden dürften.

b) CO₂-Emission über die Lebensdauer (Phasen A – D)

Als weitere Kenngröße dient die CO₂-Emission über die gesamte Lebensdauer bis hin zum Rückbau bzw. Nutzung des Recyclingpotentials in den Phasen C und D.

Gemäß den Untersuchungen in Abschnitt 4 wachsen die „grauen Emissionen“ bei einer Lebensdauer von 100 Jahren unter Berücksichtigung der TGA-Komponenten auf ca. 600 – 900 kgCO₂/m² NRF bzw. 120 – 220 kgCO₂/m³ BRI an, dieses sind umgerechnet jährlich 6,0 – 9,0 kgCO₂/m²·a bzw. 1,2 – 2,2 kgCO₂/m³·a.

Zur Reduzierung der CO₂-Emissionen sind im Folgenden verschiedene Vorschläge zusammengestellt:

1. Einpreisen von CO₂ bzw. Klimafolgekosten sowie Definition von Grenzwerten

Bauen ist planmäßig mit hohen Investitionen verbunden bzw. Bauprojekte stehen immer unter einem hohen Kostendruck. Wenn Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung in der Planung und Ausführung eine relevante Rolle spielen sollen, ist es zwingend erforderlich, dass die CO₂-Emissionen mit realistischen Klimafolgekosten eingepreist werden. Das Umweltbundesamt gibt hierzu bei einer Gleichgewichtung der Wohlfahrt heutiger und zukünftiger Generationen einen Preis von ca. 860 €/tCO₂ an [Umweltbundesamt 2024]. Bei einer mittleren CO₂-Emission von 750 kgCO₂/m² NRF wären dieses 650 €/m², die bei der Herstellung zusätzlich zu berücksichtigen wäre.

Ausgehend von einem jährlichen Mittelwert von ca. 7,5 kgCO₂/m² über eine Lebensdauer von 100 Jahren wären dieses Zusatzkosten pro Quadratmeter von 7,5 x 0,860 = 6,45 €/Jahr bzw. 6,45 / 12 = 0,54 Cent pro Monat. Eine Größenordnung, die durchaus zu berücksichtigen ist, aber gemäß Einschätzung der Autoren noch verschmerzbar, vor allem vor dem Hintergrund der entsprechenden Folgekosten, wenn nicht gehandelt wird.

Nur wenn der CO₂-Preis eingerechnet wird, werden vor allem Investoren, Bauherrn, Planer und Ausführende bemüht sein und ihr Know How entsprechend einsetzen, die Emissionen entsprechend zu reduzieren.

2. Reduzierung von Nutzfläche bzw. Raum

Grundsätzlich nimmt die CO₂-Emission mit jedem Kubikmeter Bruttorauminhalt bzw. Quadratmeter Nettoraumfläche zu, da hierfür entsprechende Mengen an Wänden, Decken inklusive aller Ausbauten zu erstellen sind. Daher ist die Reduzierung von Wohn- bzw. Nutzfläche durchaus ein effizientes Mittel, um CO₂ einzusparen.

Tatsächlich hat sich gemäß Angabe des Statistischen Bundesamtes (siehe Pressemitteilung Nr. N041 vom 29. Juni 2023) der pro Person Verfügung stehende Wohnraum in Deutschland in den letzten 30 Jahren von 34,9 m² im Jahre 1991 auf 47,7 m² im Jahre 2021 um 37 % vergrößert. Eine Einschränkung würde eindeutig mit einer entsprechenden Reduzierung der CO₂-Emission einhergehen.

Hier gilt es, ansprechende architektonisch Konzepte zum Wohnen und zum Arbeiten zu entwickeln. Im Bereich der Büro- und Verwaltungsgebäude sind ja gerade in den Ballungsräumen auch in den letzten Jahren – aus wirtschaftlichen Überlegungen – Maßnahmen wie Großraumbüros, Nutzung von Homeoffice, Desk-Sharing etc. auf dem Vormarsch, was auch unter CO₂-Aspekten Vorteile bietet.

3. Verlängerung der Lebensdauer

Die wesentlichen CO₂-Emissionen fallen in der Herstellung- und Errichtungsphase (Phase A) an. Wenn man bei den o. g. mittleren 350 kgCO₂/m² NRF für den Einbau des Bauwerks mal von einem Zeitraum von 2 Jahren ausgeht, innerhalb dem das Bauwerk (inklusive der Baustoffe) hergestellt werden, sind dieses ca. $350 / 2 = 175$ kgCO₂/m² pro Jahr, also ein ca. 105-fach höherer CO₂-Verbrauch als in der Nutzungsphase. Hieraus ergibt sich, dass

- im Falle von Nutzungsänderungen, Modernisierungen etc. ein Ersatzneubau die letzte Wahl sein sollte. Dieser kann lediglich die Vorzugsvariante sein, wenn basierend auf einer CO₂-Berechnung nachgewiesen wird, dass durch den Ersatzneubau eine derart große energetische Verbesserung eintritt, dass in Summe weniger CO₂ emittiert wird als bei einer zwingend erforderlichen Umbaumaßnahme.
- Neubauten sollten zwingend für eine lange Lebensdauer ausgelegt werden. Wenn im Extremfall die Nutzungsdauer von 50 Jahren auf 200 Jahre gesteigert wird, lässt sich der auf das Jahr umgerechnete CO₂-Wert von 8,5 kgCO₂/m²·a um fast 50 % auf 4,5 kgCO₂/m²·a reduzieren. Auch wenn dieses ein Stück weit akademisch-theoretische Werte sind, weil niemand die CO₂-Einheitswerte oder auch die generellen Bedürfnisse in 200 Jahren abschätzen kann, ist es jedoch völlig eindeutig, dass eine möglichst lange Nutzung der Bauwerke, deren Errichtung sehr viel CO₂ gekostet hat, die günstigste Alternative darstellt.

Architektonisch bedeutet dieses, dass im Zweifelsfalle möglichst flexible Gebäudekonzepte geplant werden sollten, die ein hohes Maß an Umnutzungen ermöglichen.

4. Auswahl von Materialien mit geringer CO₂-Emission

Grundsätzlich liegt der wesentliche Teil der CO₂-Emission in der Herstellung der Materialien und Baukomponenten. Basierend auf den Untersuchungen in den Abschnitten 4 und 5 können unter Beibehaltung der grundsätzlichen Gebäudekonstruktion bereits signifikante CO₂-Einsparungen erzielt werden, wenn an den entscheidenden Stellen auf CO₂-reduzierte Materialien gesetzt wird. Hierzu folgende Berechnung:

- Durchschnittlich wird für die Erstellung eines Bauwerks in Massivbauweise etwa 6 kgCO₂/m²·a verbraucht. Die Verteilung über die einzelnen Baustoffe sind in Bild 5.10 dargestellt.

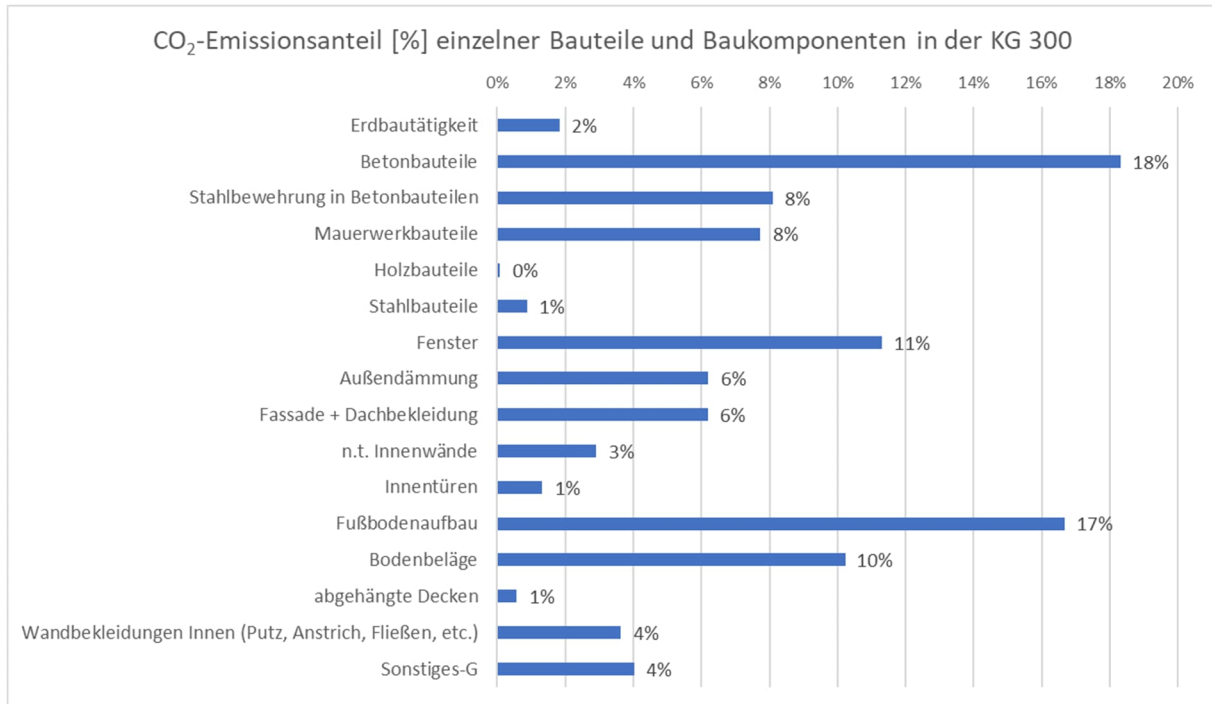


Bild 5.10 Anteil [%] der einzelnen Bauteile bzw. Baukomponenten auf die CO₂-Bilanz des Bauwerks

Die nachfolgend aufgeführten Baustoffe weisen einerseits einen sehr hohen Anteil an CO₂-Emissionen auf und zugleich sind hier entsprechende Optimierungspotentiale erkennbar:

- Beton bzw. Zement:

Im Mittel sind knapp 20 % der CO₂-Emissionen auf den Baustoff Beton zurückzuführen, wobei der wesentliche Anteil der Emission hier im Zement enthalten ist. Als Zement wird im bundesweiten Durchschnitt im Wesentlichen ein Zement CEM II eingesetzt, der zu 65 % - 94 % aus Portlandzementklinker besteht, die maßgeblich für die hohen CO₂-Emissionen verantwortlich sind. Wenn stattdessen allerdings ein Zement CEM III eingesetzt würde, bei dem ein größerer Anteil von Portlandzementklinker durch Hüttensand / Hochofenzement ersetzt wird, der quasi als Abfallprodukt bei der Stahlherstellung anfällt, lässt sich die CO₂-Emission von Beton pauschal um etwa 10 % reduzieren. Die mit dem größeren Anteil an Hochofenzement verbundene reduzierte Erhärtungsgeschwindigkeit bzw. die geringere Alkalität ist in diesen Bereichen noch unerheblich. Da der Beton einen Einfluss von knapp 20 % auf die gesamte CO₂-Emission der Gebäude aufweist, folgt aus der 10 %-ige Einsparung beim Beton eine Einsparung von ca. etwa 2 % bezogen auf die Gesamt-Emission.

- Estrich:

Die Untersuchungen in Abschnitt 4 haben gezeigt, dass der Estrich mit knapp 75 % x 17 % (Anteil des Fußbodenaufbaus) = 13 % einen wesentlichen Anteil an der Gesamt-CO₂-Emission aufweist. Wenn in den Wohn- und Trockenbereichen, die etwa 70 % der Wohnfläche ausmachen, statt dem üblicherweise verwendeten Zementestrich CO₂-optimierte Alternativen verwendet werden wie z.B. ein Estrich aus Stampflehm, kann die CO₂-Emission in den Trockenbereichen um fast 90 % bzw. bezogen auf die Gesamtfläche um ca. 60 % reduziert werden. Dieses wäre eine Reduzierung von fast 8 % bezogen auf die gesamte CO₂-Emission des Gebäudes.

- Bodenbeläge:

Auch die Bodenbeläge weisen über die Lebensdauer mit ca. 10 % einen wesentlichen Anteil an der Gesamt-CO₂-Emission auf. Problematisch sind vor allem textile Beläge mit vergleichsweise geringer Nutzungsdauer bzw. kunststoffmodifizierte Beläge wie PVC. Wenn stattdessen auf CO₂-optimierte Beläge (Massivholz-Parkett, Kautschuk-Belag) oder sehr langlebige Produkte (Keramikplatte, Natursteinplatte) eingesetzt werden, ist davon auszugehen, dass die CO₂-Emissionen über die Lebensdauer um mindestens ca. 50 % reduziert werden können, dieses sind etwa 5 % bezogen auf die gesamte CO₂-Emission.

- Dämmstoff:

Ein weiterer großer Anteil an der CO₂-Bilanz macht mit ca. 6 % die Außendämmung aus. Wenn die üblicherweise verwendete EPS-Dämmung an der Gebäudehülle durch CO₂-optimierte Produkte ersetzt wird, wie z. B. durch expandierte Korkdämmplatten ersetzt, lässt sich der CO₂-Bedarf für die Außenwärmedämmung im Gebäude um bis zu 30 % reduzieren. Bezogen auf die Gesamt-Emission sind dieses 0,06 x 30 = 2 %.

In Summe ergeben sich durch die o. g. Maßnahmen CO₂-Einsparpotentiale von 15-20 % (Tabelle 15). Hingewiesen sei natürlich, dass Gebäude unterschiedlich sind und sich und die o. g. Prozentangaben der Teilmaßnahmen nicht auf jeden Einzelfall übertragen lassen. In Summe wird aber in dem grundsätzlichen Vorgehen, die maßgeblichen CO₂-verursachenden Baustoffe zu identifizieren und diese CO₂-mäßig zu optimieren, in jedem Fall ein Einsparpotential von 15 % gesehen. Dieses lässt sich beispielsweise auch auf andere Bereiche übertragen, wie z. B. der Ersatz eines CO₂-intensiven Oberflächenschutzsystems in einer Tiefgarage durch einen Asphaltbelag mit Abdichtung, etc.

Tabelle 15 CO₂-Einsparpotentiale durch Einsatz von CO₂-optimierte Produkte

| Bauteil | Maßnahmen | Anteil an Gesamtemission | Einsparpotential | Einsparpotential bezogen auf Gesamtemission |
|--------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------|---|
| | | [%] | [%] | [%] |
| Betonbauteil | Zement CEM III | 18% | -10% | -2% |
| Estrich | Stampflehm / Holzspäne | 13% | -60% | -8% |
| Bodenbelag | Massivholzparkett / Natursteinplatte | 10% | -50% | -5% |
| Außendämmung | Korkdämmplatten | 6% | -30% | -2% |
| Summe | | | | -16% |

5. Teilersatz der massiven Bauweise durch Holzbauweise

Auch wenn die Einsparungen laut den eigenen Untersuchungen nicht ganz so drastisch ausfallen, wie vielfach publiziert, kann durch Teilersatz von Massivbauteilen durch Holz teilweise CO₂ eingespart werden. Hierzu folgende Beispiele:

- Gesamtes Gebäude in Holz- und Holzbetonverbundbauweise

Die Untersuchung in Abschnitt 5.4 zeigt, dass CO₂-Wert für ein Gebäude in Holz- und Holzbetonverbundbauweise knapp unter 5,0 kgCO₂/m²·a liegt. Dies entspricht einer Reduktion von etwa 20 % im Vergleich zum Mittelwert von ca. 6,0 kgCO₂/m²·a für Gebäude in Massivbauweise.

- Deckensysteme

Bei der Rohdecke kann der CO₂-Bedarf gemäß den Untersuchungen in Abschnitt 5.5 von i.M. 70 kgCO₂/m² für eine Stahlbetondecke auf ca. 35 kgCO₂/m² für eine Holzdecke (HBV oder Brettsperrholz) gesenkt werden. Allerdings erfordert die Einhaltung der Anforderungen an Schallschutz und Schwingungsverhalten bei Holzdecken einen aufwendigeren Deckenaufbau, der mehr Baustoffe benötigt als bei einer herkömmlichen Stahlbetondecke.

Eine signifikante Variante hinsichtlich der CO₂-Einsparung ist die Brettsperrholzdecke, die mit einem Wert von etwa 125 kgCO₂/m² deutlich unter dem durchschnittlichen CO₂-Wert von 150 kgCO₂/m² anderer Deckensysteme liegt.

In Summe ergeben sich hieraus Einsparungen von ca. 15 % bei den Decken, das sind bezogen auf das Gesamtgebäude ca. 0,15 x 30 % = 5 %.

- Wände

Gemäß den Untersuchungen in Abschnitt 5.4 kann bei Ausbildung der Wand in Holzbauweise gegenüber einer Kalksandsteinwand auch nochmal ca. 10 kgCO₂/m² Wandfläche eingespart werden, hier wirken sich sowohl der etwas geringere CO₂-Einheitwert sowie die besseren Dämmeigenschaften von Holz positiv aus, die damit zu einer geringeren erforderlichen Wärmedämmung führen. Bezogen auf die gesamte CO₂-Emission sind dieses Einsparpotentiale von etwa 1 %.

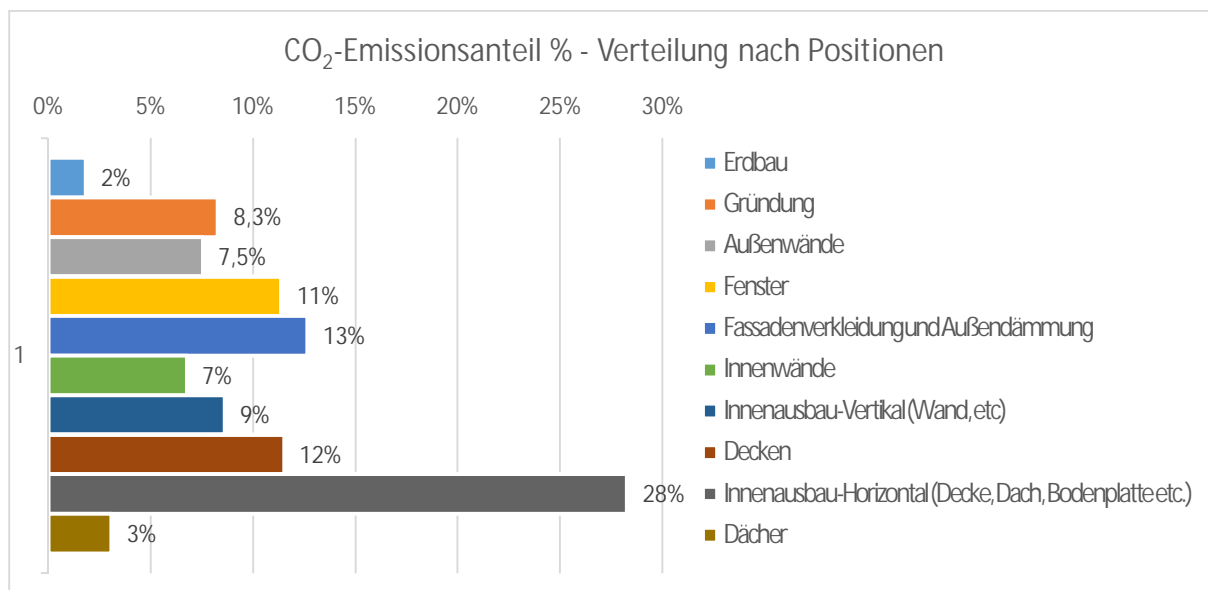


Bild 5.11 Anteil der einzelnen Positionen [%] an den gesamten CO₂-Emissionen des Bauwerks

Mit den in den Schritten 4. und 5. vorgeschlagenen Maßnahmen ergeben sich in Summe die folgenden CO₂-Emissionen:

| Einsparpotential über die gesamte Lebensdauer von 100 Jahren (Phase A bis D) | | | | |
|--|---|---|---|------------------|
| Status Quo | | Optimierung | | Einsparpotential |
| kgCO ₂ /(m ² NRF·a) | kgCO ₂ /(m ³ BRI·a) | kgCO ₂ /(m ² NRF·a) | kgCO ₂ /(m ³ BRI·a) | % |
| 6,0 | 1,4 | 4,2 | 1,0 | -30% |

Die CO₂-Emission lässt sich hiermit über die gesamte Lebensdauer um ca. 30 %.

Weitere Einsparpotentiale sind aus den Schritten 2 und 3 zu erwarten, wenn einerseits Flächen reduziert werden und zugleich dauerhaft in für eine lange Lebensdauer konstruiert wird.

Von dem in [1] angegebenen Grenzwert von ca. 32 kgCO₂/m³ BRI, der erforderlich ist, die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, ist man hiermit jedoch immer noch deutlich entfernt. Weitere Optimierungen können nur erreicht werden, wenn die CO₂-Folgekosten tatsächlich eingepreist werden und damit letztlich alle Beteiligte (Investoren, Bauherrn, Planer) ein Interesse daran haben, die CO₂-Emission zu senken.

6 Vergleich der Grauen Emission mit dem CO₂ aus dem Gebäudebetrieb

6.1 Grundlagen

Bisher wurden Gebäude kaum anhand der CO₂-Emissionen der verwendeten Bauteile bewertet, die wesentlichen Beurteilungsgrößen sind der End- bzw. Primärenergiebedarf und die daraus resultierenden CO₂-Emissionen, die im laufenden Betrieb entstehen. Diese hängen stark von der Qualität der Gebäudehülle und des verwendeten Energieträgers ab. Hierzu gibt es zahlreiche Beispielrechnungen, die sich in der Regel an gesetzlichen Vorgaben orientieren, wie z.B. der Energieeinsparverordnung (EnEV) oder dem Gebäudeenergiegesetz (GEG).

Die primärenergetischen Mindestanforderungen, die aktuell im GEG verankert sind, beziehen sich auf das Gebäude als Ganzes, also auf die Kombination aus Gebäudehülle und Anlagentechnik. Rein bauteilbezogene Anforderungen werden nur noch bei der Sanierung einzelner Bauteile in Bestandsimmobilien gestellt. Derzeit ist davon auszugehen, dass diese Anforderungen weiter verschärft werden. Mit dem gestiegenen Anspruch an die thermische Gebäudehülle steigt auch der Materialeinsatz während der Herstellungsphase des Gebäudes. Dem gegenüber steht die Energieeinsparung im Gebäudebetrieb.

Im Rahmen der folgenden Untersuchung wird für den Gebäudebetrieb im Wesentlichen der Einfluss der wärmetauschenden Hüllfläche während der Betriebsphase untersucht, da bei diesen Bauteilen ein direkter Zusammenhang zwischen den Emissionen für die Herstellung und den aus Transmissionswärmeverlusten resultierenden Emissionen besteht. Variantenuntersuchungen zu verschiedenen Dämmmaterialien werden nicht durchgeführt. Hierzu wurden im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens bereits umfangreiche Ergebnisse präsentiert [43]. Der Einfluss des Fensterflächenanteils abhängig von der Orientierung wird nicht gesondert bewertet.

In der DGNB-Studie „Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktionen“ [4] wurden bereits durchschnittliche Nennwerte für CO₂-Emissionen von typischen Wohn- und Nichtwohngebäuden im Betrieb und während der Errichtung ermittelt. Dabei wurden mögliche Einflussfaktoren auf die Emissionen berücksichtigt. Im Rahmen der Durchführung der DGNB-Studie wurden mehrere Arbeitspakete als Leitfaden zur Berechnung entwickelt.

Insgesamt umfasst die Studie 50 Gebäude (46 Bürogebäude und 4 Wohngebäude). Diese wurden anhand ihrer Brutto-Grundfläche (BGF) in drei Gruppen eingeteilt. Gruppe 1 beinhaltet 20 Gebäude mit einer BGF von 500 bis 10.000 m², Gruppe 2 19 Gebäude von 10.000 bis 20.000 m² und Gruppe 3 umfasst 11 Gebäude zwischen 20.000 und 50.000 m². Sämtliche Daten der Gebäude sind zeitaktuell und somit unter vergleichbaren Normen und Rechenvorschriften (Jahr: 2021) geplant worden. Um größere Abweichungen erklären zu können, berücksichtigt die Studie Differenzierungsmerkmale in den Kategorien Gebäudegröße (BRI, BGF, NGF), Nutzungsart, Bauweise, Gebäudetechnik (Endenergie Wärme, Art der Wärmeversorgung), Thermische Hülle (Transparente Außenbauteile) sowie rechtliche Grundlagen und Rechenmethoden (Angewandte Versionen und Methoden). Die wichtigsten Merkmale sind in der jeweiligen Kategorie beschrieben [4].

In Bild 6.1 sind die Ergebnisse der DGNB-Gebäude-Studie in einem Diagramm zusammenfassend dargestellt. Die Beispielgebäude wurden nach Datum des Energieausweises sortiert. In grün werden die Emissionen aus dem Betrieb und in grau die Treibhausgasemissionen aus der Errichtung abgebildet (in [kgCO₂e/(m²a)]). [4]

Tabelle 16 Treibhausgasemissionen aus Betrieb und Errichtung in [kgCO₂e/(m²a)] [4]

| | Produktion (GWP _K) | Betrieb (GWP _N) |
|------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Mittelwert | 8,7 | 25,1 |
| Medianwert | 8,8 | 25,6 |
| Minimum | -0,4 | -2,2 |
| Maximum | 15,5 | 48,7 |

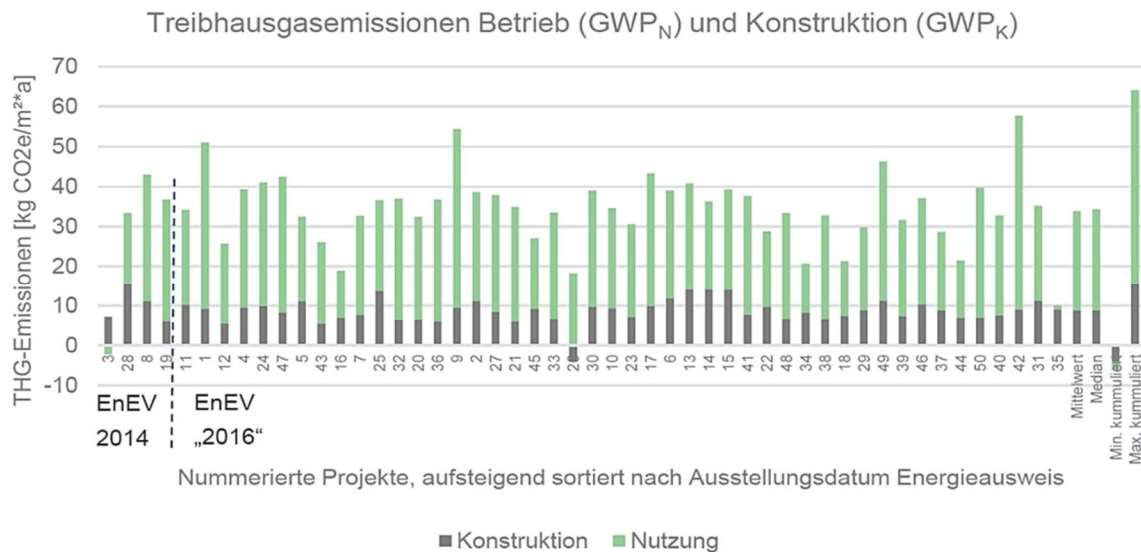


Bild 6.1: Treibhausgasemissionen aus Betrieb und Errichtung [4]

Die Ergebnisse der Studie dienen der vergleichenden Einstufung der hier durchgeführten Berechnungen.

Die Hauptanforderungsgrößen gem. GEG, der zulässige Primärenergiebedarf und die daraus resultierenden CO₂-Emissionen, hängen stark von den zugrundeliegenden Primärenergie- und Emissionsfaktoren ab.

Tabelle 17 zeigt die aktuell anzusetzenden Emissionsfaktoren unterschiedlicher Energieträger und deren Äquivalent pro kWh gem. geltendem GEG [44]. Schon hier wird deutlich, dass die Bandbreite zwischen aber auch innerhalb der Versorgungsarten sehr stark variiert. Im Bereich der Nah- und Fernwärmeversorgung bewegen sich die Emissionsfaktoren zwischen 40 und 400 g/kWh. Das bedeutet, dass allein die Wahl eines Versorgungsystems die Einstufung eines Gebäudes in eine bestimmte Effizienzklasse massiv beeinflusst, unabhängig von der Qualität der Gebäudehülle. Aus diesem Grund wird der Einfluss verschiedener Heizsysteme in die Untersuchung einbezogen.

Tabelle 17: Emissionsfaktoren unterschiedlicher Energieträger und deren Äquivalent pro kWh [44]

| Nummer | Kategorie | Energieträger | Emissionsfaktor [g CO ₂ -Äquivalent pro kWh] |
|--------|---|--|--|
| 1 | Fossile Brennstoffe | Heizöl | 310 |
| 2 | | Erdgas | 240 |
| 3 | | Flüssiggas | 270 |
| 4 | | Steinkohle | 400 |
| 5 | | Braunkohle | 430 |
| 6 | Biogene Brennstoffe | Biogas | 140 |
| 7 | | Biogas, gebäudenah erzeugt | 75 |
| 8 | | Biogenes Flüssiggas | 180 |
| 9 | | Bioöl | 210 |
| 10 | | Bioöl, gebäudenah erzeugt | 105 |
| 11 | | Holz | 20 |
| 12 | Strom | netzbezogen | 560 |
| 13 | | gebäudenah erzeugt (aus Photovoltaik oder Windkraft) | 0 |
| 14 | | Verdrängungsstrommix | 860 |
| 15 | Wärme, Kälte | Erdwärme, Geothermie, Solarthermie, Umgebungswärme | 0 |
| 16 | | Erdkälte, Umgebungskälte | 0 |
| 17 | | Abwärme aus Prozessen | 40 |
| 18 | | Wärme aus KWK, gebäudeintegriert oder gebäudenah | Nach DIN V 18599-9: 2018-09 |
| 19 | | Wärme aus Verbrennung von Siedlungsabfällen (unter pauschaler Berücksichtigung von Hilfsenergie und Stützfeuerung) | 20 |
| 20 | Nah- und Fernwärme mit Deckungsanteil der KWK an der Wärmeerzeugung von mindestens 70 % | Brennstoff: Stein-/Braunkohle | 300 |
| 21 | | Gasförmiger und flüssiger Brennstoff | 180 |
| 22 | | Erneuerbarer Brennstoff | 40 |
| 23 | Nah- und Fernwärme aus Heizwerken | Brennstoff: Stein-/Braunkohle | 400 |
| 24 | | Gasförmige und flüssige Brennstoffe | 300 |
| 25 | | Erneuerbarer Brennstoff | 60 |

6.2 Berechnungen

Alle Berechnungen wurden mit dem Programm Helena Ultra (Version von 2024) vom ZUB Kassel [45] durchgeführt. Grundlage der Berechnung ist das GEG von 2020.

Für die Vergleichsstudie werden drei verschiedene Gebäude mit unterschiedlichen Energiestandards und 3 unterschiedlichen Heizsystemen miteinander verglichen. Hierbei soll untersucht werden, welchen Einfluss der Gebäudetyp, der Energiestandard und das Heizsystem auf den Primärenergiebedarf und die CO₂-Emissionen im Gebäudelebenszyklus haben.

Im Rahmen der Untersuchung werden ein Bürogebäude (Bue4) sowie zwei typische Mehrfamilienhäuser (Woh4 und Woh5) betrachtet.

Die Berechnungsverfahren sind in den letzten Jahren zunehmend komplexer geworden, so dass es häufig nur schwer möglich ist, den Anteil der Gebäudehülle am Gesamtenergiebedarf zu identifizieren, da für unterschiedliche Bauteile verschiedene U-Werte gefordert werden. Aus diesem Grund wird in den folgenden Untersuchungen ein gemittelter U-Wert für die Gebäudehülle definiert, mit Ausnahme der Fensterflächen. Auf diese Weise lassen sich die Ergebnisse auf andere Gebäude übertragen, da der mittlere U-Wert für beliebige Konstruktionen und Flächenteile berechnet werden kann, unabhängig von geltenden Vorschriften. Aktuell entspricht ein mittlerer U-Wert im Bereich von 0,2 bis 0,3 W/(m²K) etwa der Anforderung aus dem GEG.

Folgende aktuell gültige Primärenergiefaktoren [-] und Emissionsfaktoren [g/kWh] werden bei der Ermittlung der Energiebedarfe und der CO₂-Emissionen bei den verwendeten Heizsystemen zugrunde gelegt (siehe auch Tabelle 17):

- **Niedertemperaturkessel:**

Energieträger Erdgas mit PE-Faktor 1,1; Emissionsfaktor 240 g/kWh

- **Luft-Wasser-Wärmepumpe:**

Energieträger Strom mit PE-Faktor 1,8; Emissionsfaktor 560 g/kWh

- **Fernwärme (Heizwerk):**

fossile Brennstoffe: PE-Faktor 1,3; Emissionsfaktor 300 g/kWh

- **Fernwärme (KWK) betrieben mit erneuerbarem Brennstoff:**

PE-Faktor 0,0; Emissionsfaktor 40 g/kWh

Für die Heizung wird eine niedrige Vor-/Rücklauftemperatur von 35°/28° angesetzt mit einer Flächenheizung als Übergabesystem. Im Bürogebäude wird eine einfache Lüftungsanlage zur Deckung des Luftwechsels verwendet, die Mehrfamilienhäuser werden natürlich über Fenster belüftet (Luftwechsel 0,4 1/h). Durch den Einsatz einer Lüftungsanlage mit WRG wären hier weitere Einsparungen möglich.

Für die Fenster wird ein U-Wert von 0,9 W/(m²K) festgesetzt. Für die übrigen Außenbauteile, bzw. Bauteile der wärmetauschenden Hüllfläche werden mittlere U-Werte bestimmt. Untersucht wird der Bereich zwischen 0,1 bis 1,0 W/(m²K).

6.2.1 Ergebnisse MFH Woh4

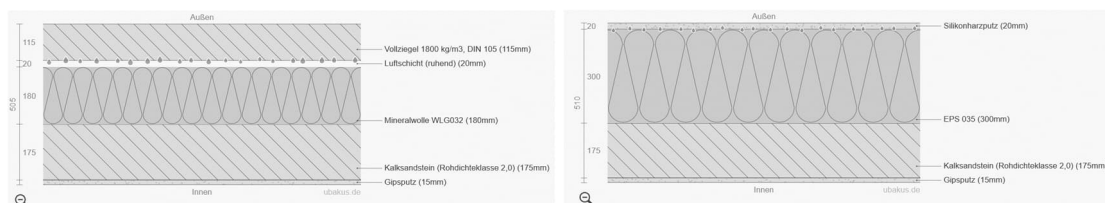
Für das Mehrfamilienhaus Woh4 werden ausgehend vom vorliegenden Energieausweis [46] Varianten zum Dämmstandard und zur Gebäudetechnik in die Betrachtung aufgenommen.

Tabelle 18: Wesentliche Kenndaten des Gebäudes MFH Woh4

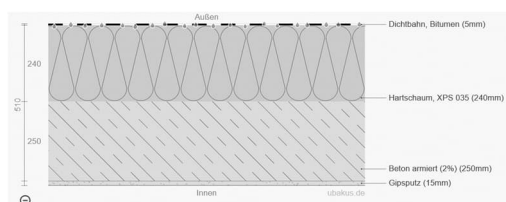
| | |
|-------------------------|------------------------|
| Bruttovolumen V_e | 3.361,4 m ³ |
| Gebäudenutzfläche A_N | 1.075,6 m ² |
| Thermische Hüllfläche | 1.621,5 m ² |
| A/V_e -Verhältnis | 0,48 m ⁻¹ |

Folgende Flächen und beispielhafte Bauteilaufbauten werden bei der Berechnung für die wärmetauschende Hüllfläche für das MFH Woh4 berücksichtigt:

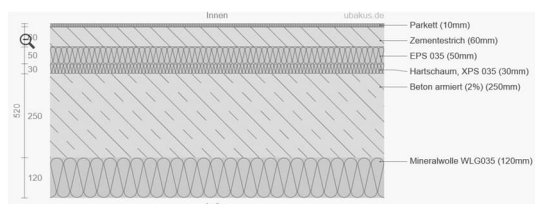
- Außenwandfläche Klinker: 401,6 m²; Außenwandfläche WDVS: 147 m²



- Flachdach: 272,3 m²; Decke Terrasse: 113,5 m²



- Decke über unbeheiztem Kellergeschoss: 385,8 m²



Alle Bauteilabbildungen erstellt mit ubakus;
<https://www.ubakus.de>

- Fensterfläche: 196,8 m

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Berechnungen für die unterschiedlichen Heizsysteme Niedertemperaturkessel (Erdgas), Luft-Wasser-Wärmepumpe (Strom), Fernwärme (Heizwerk fossil) und Fernwärme (KWK mit erneuerbarem Brennstoff) mit den verschiedenen Dämmstandards tabellarisch und grafisch dargestellt.

Niedertemperaturkessel (Erdgas)

In Tabelle 19 sind die Ergebnisse für die verschiedenen Dämmstandards bei einer Beheizung mit einem Niedertemperaturkessel zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 19: Ergebnisübersicht für das MFH Woh4; Beheizung mit Niedertemperaturkessel (Erdgas)

| | 0,1 | 0,15 | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | 0,6 | 0,7 | 1 |
|--|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | | | |
| spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)] | 15,6 | 18,4 | 21,3 | 27,1 | 33,2 | 39,3 | 45,5 | 51,9 | 71 |
| spez. Endenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 51,2 | 54,1 | 57,1 | 63,2 | 69,5 | 76 | 82,5 | 89,2 | 109,2 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 57,47 | 60,7 | 63,99 | 70,77 | 77,75 | 84,87 | 92,11 | 99,41 | 121,56 |
| spez. Transmissionswärmeverlust HT' [W/(m ² K)] | 0,24 | 0,275 | 0,311 | 0,382 | 0,453 | 0,524 | 0,595 | 0,666 | 0,878 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 12,8 | 13,5 | 14,2 | 15,7 | 17,3 | 18,8 | 20,4 | 22 | 26,9 |

Luft-Wasser-Wärmepumpe (Strom) Tabelle 21 zeigt die Ergebnisse für den Betrieb mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe. Erwartungsgemäß sinkt der Endenergiebedarf durch den Einsatz der Wärmepumpe und dies führt zu einem niedrigeren Primärenergiebedarf.

Tabelle 20: Emissionsfaktoren unterschiedlicher Energieträger und deren Äquivalent pro kWh [3]

| | | | |
|----|-------|--|-----|
| 12 | Strom | netzbezogen | 560 |
| 13 | | gebäudenah erzeugt (aus Photovoltaik oder Windkraft) | 0 |
| 14 | | Verdrängungsstrommix | 860 |

Tabelle 21: Ergebnisübersicht für das MFH Woh4; Beheizung mit Luft-Wasser-Wärmepumpe (Strom)

| | 0,1 | 0,15 | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | 0,6 | 0,7 | 1 |
|--|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | | | |
| spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)] | 15,6 | 18,4 | 21,3 | 27,1 | 33,2 | 39,3 | 45,5 | 51,9 | 71 |
| spez. Endenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 15,1 | 16 | 16,8 | 18,6 | 20,4 | 22,3 | 24,2 | 26,1 | 31,8 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 27,24 | 28,76 | 30,31 | 33,49 | 36,76 | 40,1 | 43,5 | 46,93 | 57,32 |
| spez. Transmissionswärmeverlust HT' [W/(m ² K)] | 0,24 | 0,275 | 0,311 | 0,382 | 0,453 | 0,524 | 0,595 | 0,666 | 0,878 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 8,5 | 8,9 | 9,4 | 10,4 | 11,4 | 12,5 | 13,5 | 14,6 | 17,8 |

Fernwärme fossil und erneuerbar

In den weiteren Berechnungen wird der Einfluss des Emissionsfaktors bei Versorgung mit Fernwärme für zwei Varianten gegenübergestellt. In der ersten Variante wird der Emissionsfaktor für Fernwärme aus gasförmigen Brennstoffen aus Heizwerken verwendet (Zeile 24), in der zweiten Variante wird die Versorgung mit Fernwärme (KWK) betrieben mit erneuerbarem Brennstoff (Zeile 22) eingesetzt.

Tabelle 22: Emissionsfaktoren unterschiedlicher Energieträger und deren Äquivalent pro kWh [3]

| | | | |
|----|---|--------------------------------------|-----|
| 20 | Nah- und Fernwärme mit Deckungsanteil der KWK an der Wärmeerzeugung von mindestens 70 % | Brennstoff: Stein-/Braunkohle | 300 |
| 21 | | Gasförmiger und flüssiger Brennstoff | 180 |
| 22 | | Erneuerbarer Brennstoff | 40 |
| 23 | Nah- und Fernwärme aus Heizwerken | Brennstoff: Stein-/Braunkohle | 400 |
| 24 | | Gasförmige und flüssige Brennstoffe | 300 |
| 25 | | Erneuerbarer Brennstoff | 60 |

Tabelle 23: Ergebnisübersicht für das MFH Woh4; Beheizung mit Fernwärme (Heizwerk, fossil)

| | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 1 |
| spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)] | 15,6 | 18,4 | 21,3 | 27,1 | 33,2 | 39,3 | 45,5 | 51,9 | 71 |
| spez. Endenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 52,8 | 55,6 | 58,5 | 64,4 | 70,4 | 76,7 | 83 | 89,3 | 108,6 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 69,49 | 73,15 | 76,89 | 84,57 | 92,48 | 100,56 | 108,75 | 117,03 | 142,13 |
| spez. Transmissionswärmeverlust HT' [W/(m ² K)] | 0,24 | 0,275 | 0,311 | 0,382 | 0,453 | 0,524 | 0,595 | 0,666 | 0,878 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 16,3 | 17,1 | 18 | 19,8 | 21,6 | 23,5 | 25,4 | 27,3 | 33,1 |

Tabelle 24: Ergebnisübersicht für das MFH Woh4; Beheizung mit Fernwärme (KWK, erneuerbar)

| | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 1 |
| spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)] | 15,6 | 18,4 | 21,3 | 27,1 | 33,2 | 39,3 | 45,5 | 51,9 | 71 |
| spez. Endenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 52,8 | 55,6 | 58,5 | 64,4 | 70,4 | 76,7 | 83 | 89,3 | 108,6 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 3,23 | 3,23 | 3,23 | 3,23 | 3,23 | 3,23 | 3,23 | 3,23 | 3,23 |
| spez. Transmissionswärmeverlust HT' [W/(m ² K)] | 0,24 | 0,275 | 0,311 | 0,382 | 0,453 | 0,524 | 0,595 | 0,666 | 0,878 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 3 | 3,2 | 3,3 | 3,5 | 3,8 | 4 | 4,3 | 4,5 | 5,3 |

Erwartungsgemäß ist der Endenergiebedarf bei Einsatz der Wärmepumpe am niedrigsten. Dies hängt mit dem Funktionsprinzip der Wärmepumpe zusammen. Die Werte vom NT-Kessel und der Fernwärme liegen auf einem vergleichbaren Niveau. Der Endenergiebedarf von Fernwärme (fossil) und Fernwärme (erneuerbar) ist identisch.

Während die Wärmepumpe beim Endenergiebedarf zu den niedrigsten Werten führt, ergibt sich bei den spezifischen CO₂-Emissionen ein anderes Ergebnis. Durch den hohen Emissionsfaktor für netzbezogenen Strom, der bei der Berechnung der Wärmepumpe verwendet wurde, ergeben sich relativ hohe Emissionswerte. Diese könnten bei teilweisem Einsatz von regenerativ erzeugtem Strom deutlich reduziert werden. Bei Verwendung von 100 % regenerativ erzeugtem Strom wären keine CO₂-Emissionen mehr vorhanden (PE-Faktor 0).

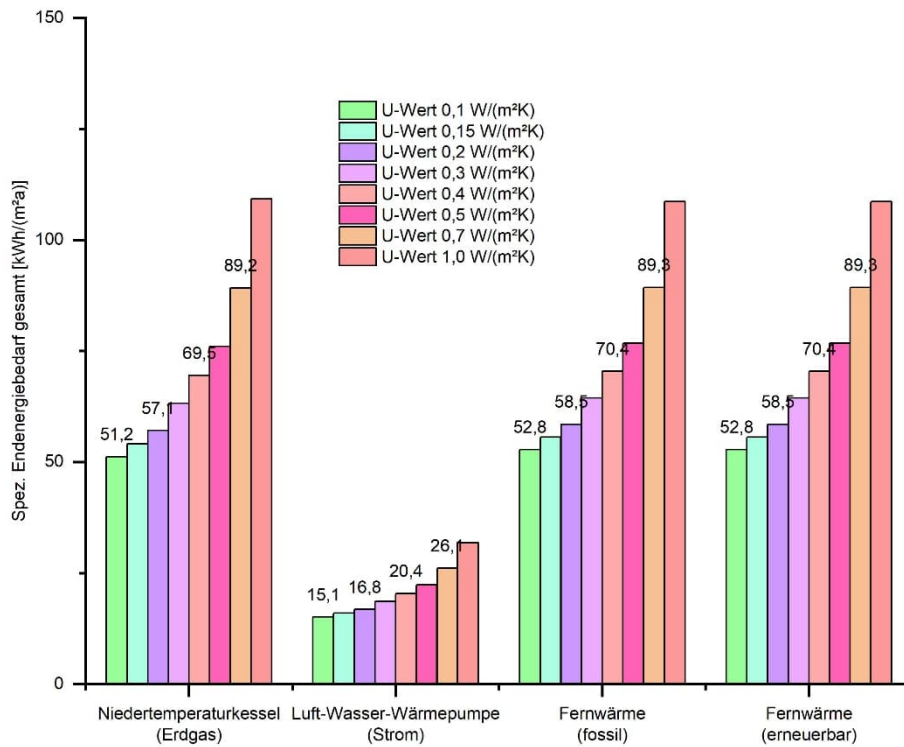


Bild 6.2.1: Spez. Endenergiebedarf für das MFH Woh4 bei unterschiedlicher Anlagentechnik mit verschiedenen Dämmstandards

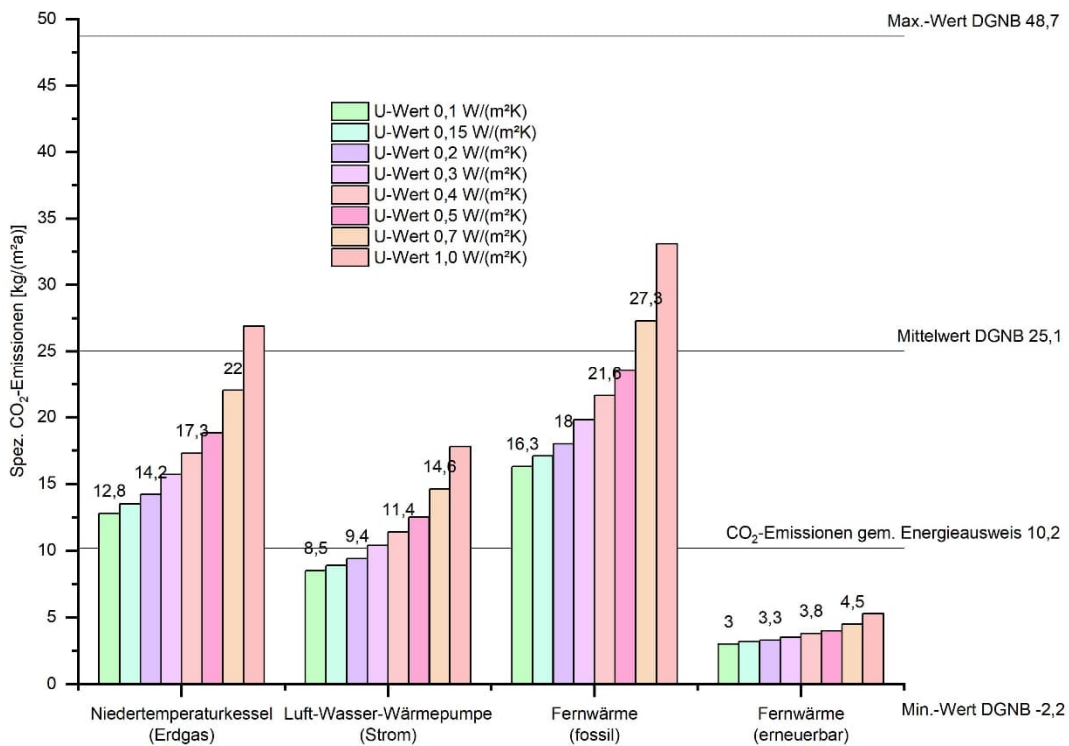


Bild 6.2.2: Spezifische CO₂-Emissionen für das MFH Woh4 bei unterschiedlicher Anlagentechnik mit verschiedenen Dämmstandards

Besonders deutlich wird der Einfluss des Emissionsfaktors bei der Fernwärmeversorgung. Bei Einsatz von Fernwärme aus KWK mit erneuerbarem Brennstoff wirkt sich der Dämmstandard nur noch unwesentlich auf die entstehenden Emissionen aus, so dass selbst ein Gebäude mit einem mittleren U-Wert von 1,0 W/(m²K) Emissionswerte erreicht, die unterhalb von allen anderen Versorgungssystemen liegen.

In der Originalberechnung des Energieausweises wurden für das Gebäude CO₂-Emissionen in Höhe von 10,2 kg CO₂-Äquivalent/(m²a) ermittelt. Versorgt wird das MFH mit Fernwärme aus KWK mit fossilen Brennstoffen und liegt damit im mittleren Bereich der hier betrachteten Emissionsfaktoren für eine Nah-/Fernwärmeversorgung.

Um den Zusammenhang zwischen Emissionen aus Betrieb und Herstellung zu untersuchen, werden nachfolgend der benötigte jährliche Heizwärmebedarf und die daraus resultierenden CO₂-Emissionen mit den Emissionen für die Herstellung der Bauteile der wärmetauschenden Hüllfläche miteinander verglichen. Ausgehend von einem mittleren U-Wert von 0,4 W/(m²K) wird das Einsparpotenzial einer U-Wert-Verbesserung auf 0,2 bzw. 0,1 W/(m²K) untersucht. Die U-Wert-Verbesserung wird durch eine Erhöhung der Dämmstärke in den jeweiligen Bauteilen erreicht, die zu einer Erhöhung der Herstellungsemissionen führt. Tabelle 25 zeigt den Heizwärmebedarf für verschiedene Dämmstandards und die daraus resultierenden CO₂-Emissionen bei Verwendung des Niedertemperaturkessels. Dem gegenüber stehen die CO₂-Emissionen, die während der Herstellung und über die Nutzungsphase von 100 Jahren entstehen.

Tabelle 25: Vergleich zwischen CO₂-Emissionen aus Betrieb und Errichtung; NT-Kessel

| U-Wert [W/(m ² K)] | Heizwärmebedarf Q _h [kWh/Jahr] | | CO ₂ -Emissionen [kgCO ₂ / Jahr] | | CO ₂ -Emissionen Herstellung [kgCO ₂] Nutzungsdauer 100 Jahre | | | |
|----------------------------------|--|-----------|---|-----------|---|-----------|------|-------|
| | | Differenz | | Differenz | | Differenz | | |
| 0,4 | 38849 | | 20232 | | 235917 | | | |
| 0,2 | 24932 | 13917 | 16699 | 3533 | 254898 | 18981 | 5,4 | Jahre |
| 0,1 | 18331 | 6601 | 15023 | 1676 | 294214 | 39316 | 23,5 | Jahre |

Durch die Erhöhung des Dämmstandards sinken die CO₂-Emissionen aus dem Betrieb, gleichzeitig steigen die Emissionen für die Dämmstoffherstellung.

Der Aufwand, um den Dämmstandard von 0,4 W/(m²K) auf 0,2 W/(m²K) zu verbessern, entspricht der Verbrauchseinsparung über eine Dauer von 5,4 Jahren. Eine Verbesserung auf 0,1 W/(m²K) erhöht den Herstellungsaufwand auf ein Verbrauchsäquivalent von 23,5 Jahren.

Bei der Wärmepumpe entspricht der Aufwand, um den Dämmstandard von 0,4 W/(m²K) auf 0,2 W/(m²K) zu verbessern, der Verbrauchseinsparung über eine Dauer von 8,1 Jahren. Eine Verbesserung auf 0,1 W/(m²K) erhöht den Herstellungsaufwand auf ein Verbrauchsäquivalent von 35,2 Jahren (siehe Tabelle 26)

In der Berechnung entstehen die Emissionen durch die Verwendung von Netzstrom (Zeile 12, Tabelle 20). Gebäudenah erzeugter Strom oder die Verwendung von Strom aus rein regenerativen Quellen ist derzeit in der Berechnung nicht vorgesehen, würde aber aufgrund des Emissionsfaktors Null (Zeile 13, Tabelle 20) keine Emissionen im Betrieb verursachen.

Tabelle 26: Vergleich zwischen CO₂-Emissionen aus Betrieb und Errichtung; Wärmepumpe

| U-Wert [W/(m ² K)] | Heizwärmebedarf Q _h [kWh/Jahr] | | CO ₂ -Emissionen [kgCO ₂ / Jahr] | | CO ₂ -Emissionen Herstellung [kgCO ₂] Nutzungsdauer 100 Jahre | | | |
|----------------------------------|--|-----------|---|-----------|---|-----------|------|-------|
| | | Differenz | | Differenz | | Differenz | | |
| 0,4 | 38849 | | 13403 | | 235917 | | | |
| 0,2 | 24932 | 13917 | 11049 | 2354 | 254898 | 18981 | 8,1 | Jahre |
| 0,1 | 18331 | 6601 | 9933 | 1116 | 294214 | 39316 | 35,2 | Jahre |

Tabelle 27: Vergleich zwischen CO₂-Emissionen aus Betrieb und Errichtung; Fernwärme fossil

| U-Wert [W/(m ² K)] | Heizwärmebedarf Q _h [kWh/Jahr] | | CO ₂ -Emissionen [kgCO ₂ / Jahr] | | CO ₂ -Emissionen Herstellung [kgCO ₂] Nutzungsdauer 100 Jahre | | | |
|----------------------------------|--|-----------|---|-----------|---|-----------|------|-------|
| | | Differenz | | Differenz | | Differenz | | |
| 0,4 | 38849 | | 25315 | | 235917 | | | |
| 0,2 | 24932 | 13917 | 21098 | 4217 | 254898 | 18981 | 4,5 | Jahre |
| 0,1 | 18331 | 6601 | 19098 | 2000 | 294214 | 39316 | 19,7 | Jahre |

Tabelle 28: Vergleich zwischen CO₂-Emissionen aus Betrieb und Errichtung; Fernwärme erneuerbar

| U-Wert [W/(m ² K)] | Heizwärmebedarf Q _h [kWh/Jahr] | | CO ₂ -Emissionen [kgCO ₂ / Jahr] | | CO ₂ -Emissionen Herstellung [kgCO ₂] Nutzungsdauer 100 Jahre | | | |
|----------------------------------|--|-----------|---|-----------|---|-----------|-------|-------|
| | | Differenz | | Differenz | | Differenz | | |
| 0,4 | 38849 | | 4397 | | 235917 | | | |
| 0,2 | 24932 | 13917 | 3835 | 562 | 254898 | 18981 | 33,8 | Jahre |
| 0,1 | 18331 | 6601 | 3568 | 267 | 294214 | 39316 | 147,3 | Jahre |

Bei Beheizung mit Fernwärme aus erneuerbaren Energien sinken die Emissionen im Betrieb deutlich (siehe Tabelle 28).

Dies führt dazu, dass bei einem mittleren U-Wert von 0,1 W/(m²K) der Herstellungsaufwand für die Bauteile so hoch wird, dass diese Emissionen erst in 147,3 Jahren durch den Betrieb wieder eingespart werden können.

Um die U-Werte zu verbessern wurde die Dämmstärke in den Bauteilschichten erhöht. Ab einem U-Wert von etwa 0,2 W/(m²K) nehmen die Emissionen für die Herstellung exponentiell zu, so dass die mögliche Einsparung an Transmissionswärmeverlusten den erhöhten Herstellungsaufwand kaum noch rechtfertigt.

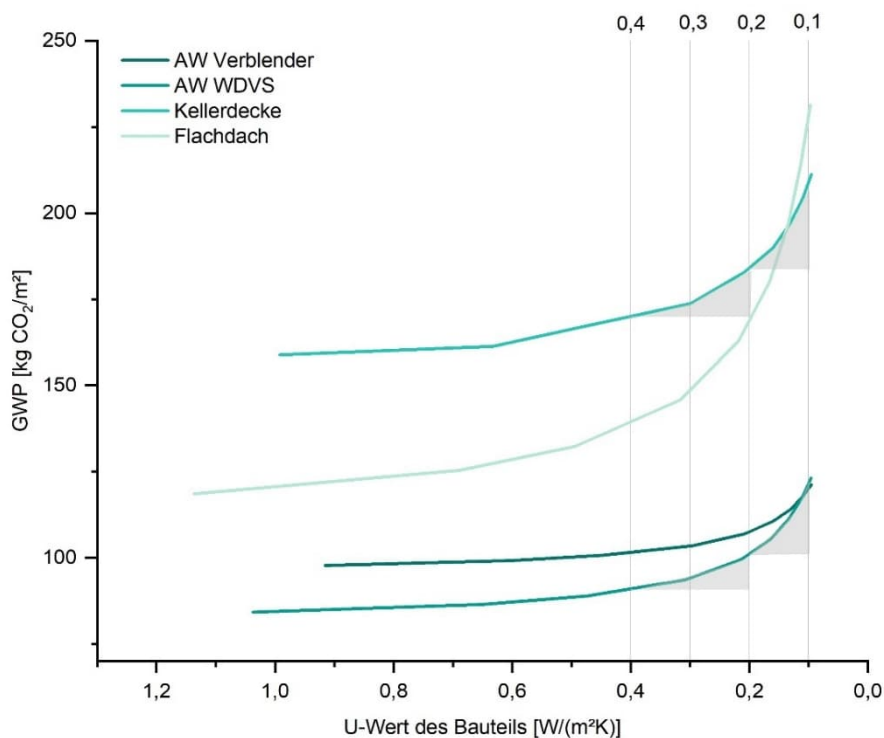


Bild 6.2.3: Emissionen Herstellung von Bauteilen bezogen auf den resultierenden U-Wert

Um einzuschätzen, inwieweit sich der erhöhte Materialaufwand zur Verbesserung des U-Wertes im Verhältnis zu den eingesparten CO₂-Emissionen tatsächlich im Betrieb auswirkt, wurden die Betriebseinsparungen über eine Dauer von 100 Jahren ermittelt und mit den Emissionen für den Herstellungsprozess verglichen (inkl. ggf. notwendiger Instandhaltungsmaßnahmen). Ausgangswert ist der Gebäudebetrieb mit einem mittleren U-Wert von 0,4 W/(m²K) (ohne Fenster), der im ersten Schritt auf 0,2 (grün) und dann auf 0,1 W/(m²K) (lila) verbessert wird (siehe Bild 6.2.4).

! Hinweis: Die Emissionen zur Herstellung des gesamten Gebäudes sind deutlich höher, da hier nur die Bauteile der wärmetauschenden Hüllfläche einbezogen wurden, die einen direkten Einfluss auf die betriebsbedingten Emissionen haben.

Bei Einsatz herkömmlicher Heiztechnik und den daraus resultierenden Emissionen liegt der Emissionsanteil aus dem Betrieb deutlich über dem der Herstellung. Dies gilt auch für die Wärmepumpe, da die Emissionen aus dem aktuellen Strom-Mix resultieren, der noch einen hohen Anteil fossiler Energieerzeuger beinhaltet. Wenn aber langfristig der Anteil dieser Emissionen gesenkt wird, wie am Beispiel der Fernwärme aus erneuerbaren Energien (FW ern.), übersteigen die Emissionen zur U-Wert-Verbesserung auf 0,1 W/(m²K)* die tatsächlichen Einsparungen in 100 Jahren Gebäudebetrieb um etwa 12.600 kg.

*entspricht inkl. Fenstern einem spez. Transmissionswärmeverlust von 0,24 W/(m²K) für dieses Gebäude

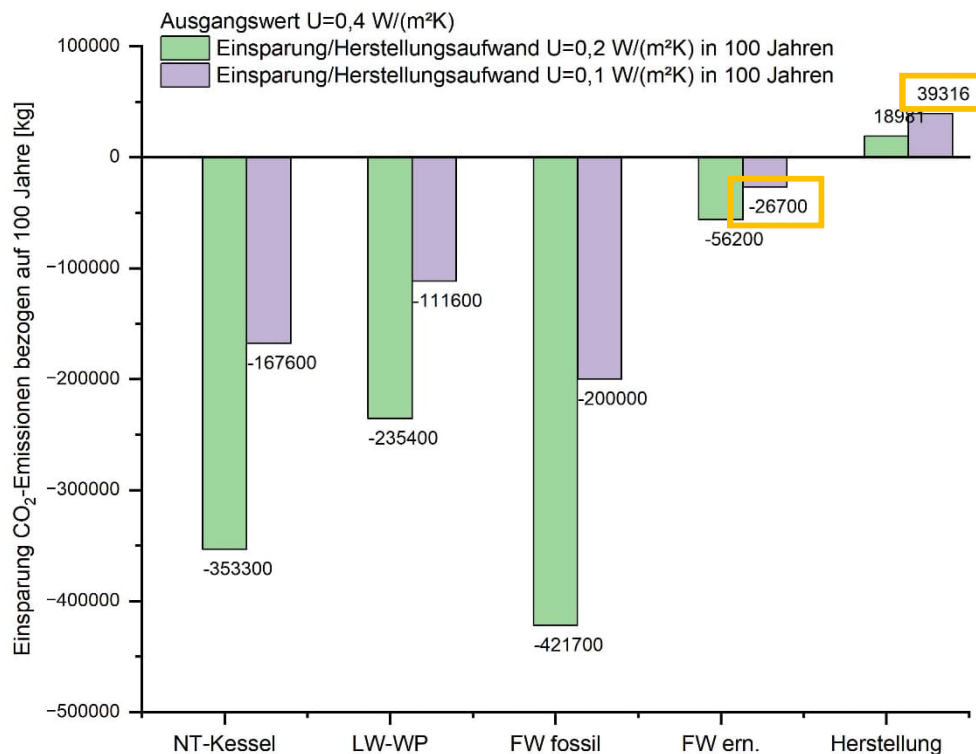


Bild 6.2.4: Einsparung an CO₂-Emissionen gegenüber einem mittleren U-Wert von 0,4 W/(m²K) durch Verbesserung auf U = 0,2 bzw. 0,1 W/(m²K), sowie Anstieg der Emissionen zur Herstellung des höheren Dämmstandards

6.2.2. Ergebnisse MFH Woh5

Bei dem Mehrfamilienhaus Woh5 handelt es sich um ein Gebäude aus dem Jahr 1968, das in Teilen saniert wurde. Als Heizung ist aktuell ein mit Heizöl betriebener Niedertemperaturkessel aus dem Jahr 2016 im Einsatz. Eine Lüftungsanlage ist nicht vorhanden.

Tabelle 29: Wesentliche Kenndaten des Gebäudes MFH Woh5

| | |
|-------------------------|------------------------|
| Bruttovolumen V_e | 4.079,0 m ³ |
| Gebäudenutzfläche A_N | 1.305,3 m ² |
| Thermische Hüllfläche | 1.387,6 m ² |
| A/V_e -Verhältnis | 0,34 m ⁻¹ |

In Tabelle 30 bis Tabelle 33 sind die Ergebnisse für die verschiedenen Dämmstandards bei einer Beheizung mit unterschiedlichen Heizsystemen für das untersuchte MFH Woh5 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 30: Ergebnisübersicht für das MFH Woh5; Beheizung mit Niedertemperaturkessel (Erdgas)

| | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 1 |
| spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)] | 32,9 | 35,8 | 38,7 | 44,4 | 50,3 | 56,1 | 62 | 67,8 | 85,5 |
| spez. Endenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 72 | 75 | 78 | 84,1 | 90,2 | 96,3 | 102,4 | 108,6 | 127,1 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 80,44 | 83,74 | 87,07 | 93,77 | 100,51 | 107,27 | 114,05 | 120,84 | 141,28 |
| spez. Transmissionswärmeverlust HT' [W/(m ² K)] | 0,255 | 0,294 | 0,334 | 0,413 | 0,493 | 0,572 | 0,652 | 0,731 | 0,969 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 17,8 | 18,6 | 19,3 | 20,8 | 22,2 | 23,7 | 25,2 | 26,7 | 31,2 |

Tabelle 31: Ergebnisübersicht für das MFH Woh5; Beheizung mit Luft-Wasser-Wärmepumpe (Strom)

| | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 1 |
| spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)] | 32,9 | 35,8 | 38,7 | 44,4 | 50,3 | 56,1 | 62 | 67,8 | 85,5 |
| spez. Endenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 21,1 | 22 | 22,8 | 24,6 | 26,4 | 28,1 | 29,9 | 31,7 | 37 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 38,01 | 39,56 | 41,12 | 44,27 | 47,43 | 50,6 | 53,79 | 56,97 | 66,57 |
| spez. Transmissionswärmeverlust HT' [W/(m ² K)] | 0,255 | 0,294 | 0,334 | 0,413 | 0,493 | 0,572 | 0,652 | 0,731 | 0,969 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 11,8 | 12,3 | 12,8 | 13,8 | 14,8 | 15,7 | 16,7 | 17,7 | 20,7 |

Tabelle 32: Ergebnisübersicht für das MFH Woh5; Beheizung mit Fernwärme (Heizwerk, fossil)

| | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | | | | | |
|--|--|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 1 |
| spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)] | 32,9 | 35,8 | 38,7 | 44,4 | 50,3 | 56,1 | 62 | 67,8 | 85,5 |
| spez. Endenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 72,9 | 75,7 | 78,6 | 84,5 | 90,4 | 96,3 | 102,2 | 108,1 | 125,9 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 95,6 | 99,35 | 103,12 | 110,72 | 118,36 | 126,02 | 133,71 | 141,41 | 164,57 |
| spez. Transmissionswärmeverlust HT' [W/(m ² K)] | 0,255 | 0,294 | 0,334 | 0,413 | 0,493 | 0,572 | 0,652 | 0,731 | 0,969 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 22,3 | 23,2 | 24,1 | 25,8 | 27,6 | 29,3 | 31,1 | 32,9 | 38,2 |

Tabelle 33: Ergebnisübersicht für das MFH Woh5; Beheizung mit Fernwärme (KWK, erneuerbar)

| | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 1 |
| spez. Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)] | 32,9 | 35,8 | 38,7 | 44,4 | 50,3 | 56,1 | 62 | 67,8 | 85,5 |
| spez. Endenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 72,9 | 75,7 | 78,6 | 84,5 | 90,4 | 96,3 | 102,2 | 108,1 | 125,9 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 3,16 | 3,16 | 3,16 | 3,16 | 3,16 | 3,16 | 3,16 | 3,16 | 3,16 |
| spez. Transmissionswärmeverlust HT' [W/(m ² K)] | 0,255 | 0,294 | 0,334 | 0,413 | 0,493 | 0,572 | 0,652 | 0,731 | 0,969 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 3,8 | 3,9 | 4,1 | 4,3 | 4,5 | 4,8 | 5 | 5,2 | 6 |

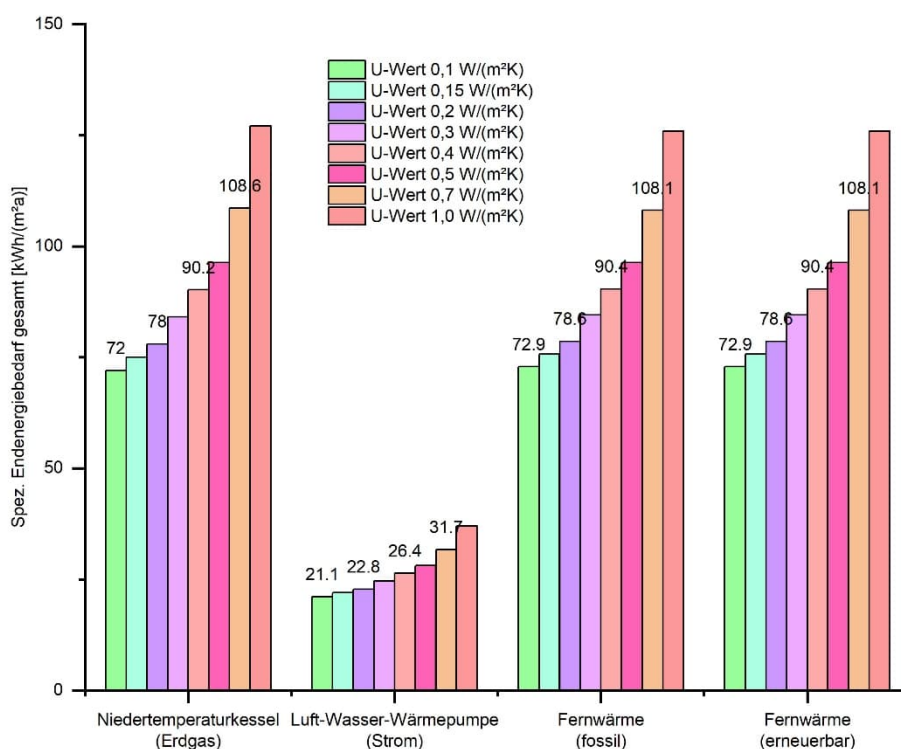


Bild 6.2.5: Spez. Endenergiebedarf für das MFH Woh5 bei unterschiedlicher Anlagentechnik mit verschiedenen Dämmstandards

Grundsätzlich ergeben sich bei den Berechnungen vergleichbare Werte wie bei dem zuvor betrachteten Mehrfamilienhaus. Die Grafiken in Bild 6.2.5 und Bild 6.2.6 zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf. Abweichungen ergeben sich aus der Gebäudegeometrie und der Anordnung von Fensterflächen, die aufgrund der Strahlungsbilanz die Gesamtergebnisse mit beeinflussen.

Auch der Vergleich mit den Ergebnissen der Emissionswerte, die im Rahmen der DGNB-Studie ermittelt wurden, zeigt eine gute Übereinstimmung mit den für dieses Gebäude ermittelten Werten. Bei Wohngebäuden sind der Endenergiebedarf und die daraus resultierenden Emissionen im Verhältnis zu Nichtwohngebäuden in der Regel etwas niedriger, da bei NWG auch der Energieanteil für die Beleuchtung mit einfließt. In der DGNB-Studie wurden vorrangig Bürogebäude untersucht.

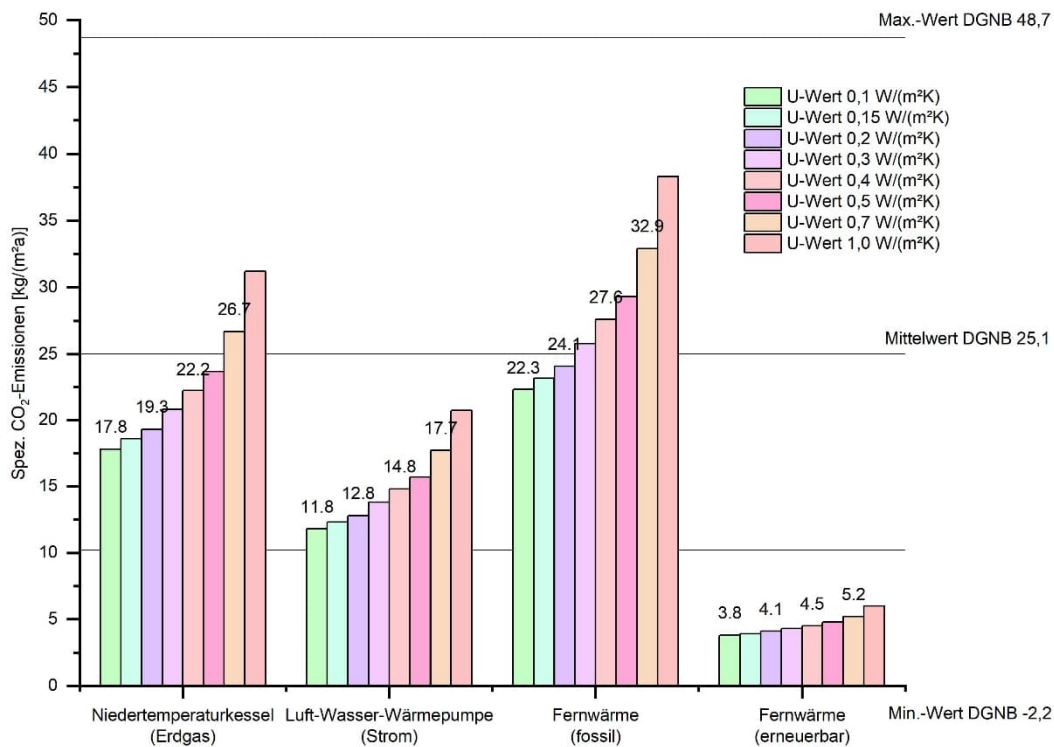


Bild 6.2.6: Spezifische CO₂-Emissionen für das MFH Woh5 bei unterschiedlicher Anlagentechnik mit verschiedenen Dämmstandards

Die Ergebnisse der beiden Mehrfamilienhäuser sind in den Bildern 6.2.7 und 6.2.8 zusammenfassend dargestellt. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen wurden hier die spezifischen Transmissionswärmeverluste als Bezugsgröße gewählt, die bei Wohngebäuden auf dem Energieausweis zu finden sind. Diese beinhalten auch die U-Werte der Fensterflächen.

In Bild 6.2.7 können die spezifischen CO₂-Emissionen für die unterschiedlichen Heizsysteme in Abhängigkeit des spezifischen Transmissionswärmeverlustes abgelesen werden. Unterschiedliche Anlagentechnik führt beispielsweise bei einem spezifischen Transmissionswärmebedarf von 0,3 W/(m²K) zu möglichen Emissionen zwischen 3,3 und 23,2 kgCO₂/(m²a) (Δ 20 kgCO₂/(m²a)). Durch die Verbesserung der Gebäudehülle von 0,5 auf 0,3 W/(m²K) können bei der Wärmepumpe nur ca. 3 kgCO₂/(m²a) eingespart werden.

Bild 6.2.8 zeigt am Beispiel der Beheizung mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe den Zusammenhang zwischen Heizwärme- und Endenergiebedarf bezogen auf den spezifischen Transmissionswärmeverlust. Hier zeigt sich, dass die Reduzierung des Heizwärmebedarfs nicht in gleichem Maße zu einer Senkung des Endenergiebedarfs führt, die Differenz nimmt bei Verbesserung der Gebäudehülle ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass neben der Qualität der Gebäudehülle insbesondere Lüftungswärmeverluste die Höhe des Heizwärmebedarfs beeinflussen, die unabhängig von der Hüllfläche vorhanden sind.

Da diese Grafiken nur auf der Auswertung von zwei Gebäuden beruhen, lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen für Mehrfamilienhäuser daraus ablesen. Bei Kenntnis des vorhandenen spezifischen Transmissionswärmeverlustes kann jedoch grob abgeschätzt werden, wie sich die spezifischen CO₂-Emissionen bei Verbesserungen an der wärmetauschenden Hüllfläche und/oder bei einer anderen Art der Anlagentechnik verändern.

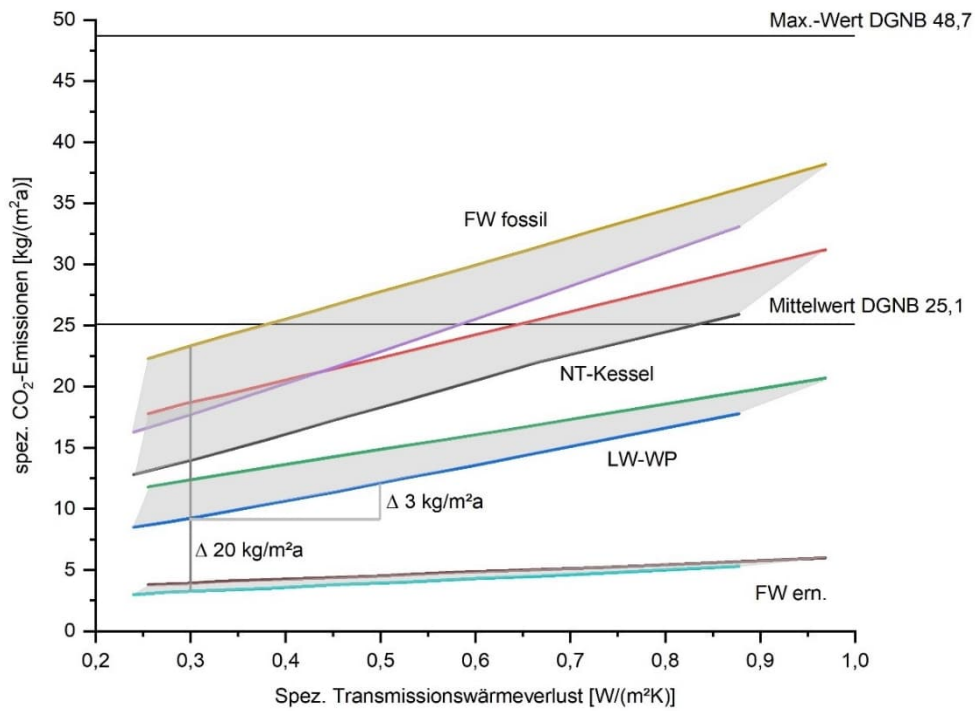


Bild 6.2.7: Spez. CO₂-Emissionen in Abhängigkeit des spez. Transmissionswärmeverlustes für unterschiedliche Heizsysteme

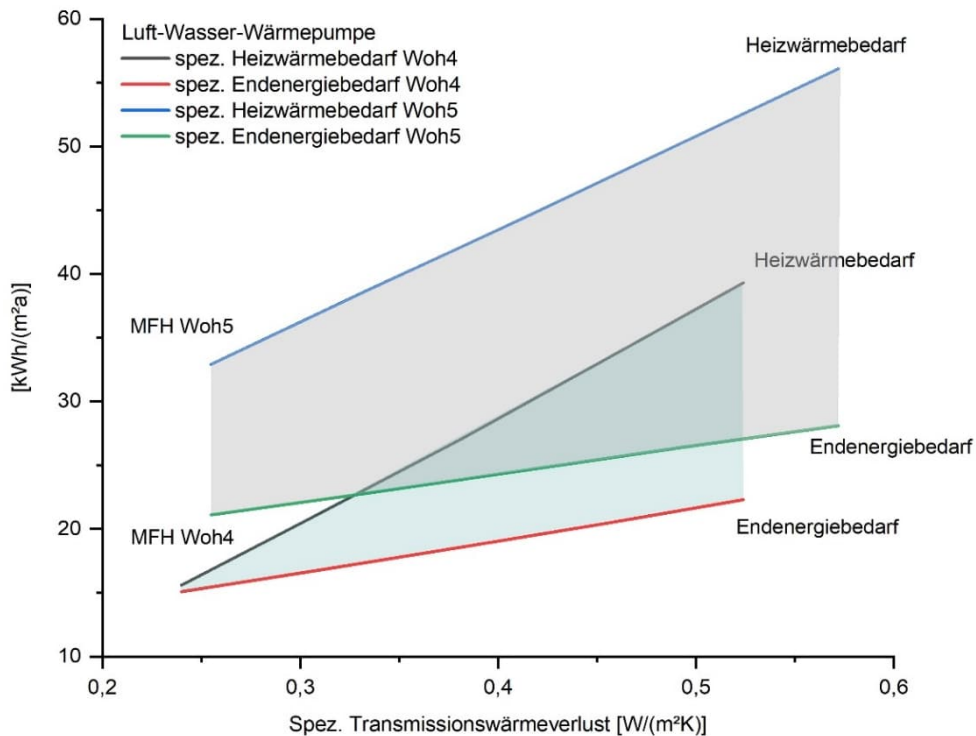


Bild 6.2.8: Zusammenhang zwischen Heizwärme-/Endenergiebedarf bezogen auf den spez. Transmissionswärmeverlust

Ergänzend zu den vorangegangenen Untersuchungen wird exemplarisch noch der Einflussfaktor A/V_e -Verhältnis für das Mehrfamilienhaus Woh4 ausgewertet. Der mittlere U-Wert 0,2

W/(m²K) entspricht bei diesem Gebäude einem spez. Transmissionswärmeverlust von 0,31 W/(m²K) und liegt damit knapp über dem ausgewiesenen Wert im Energieausweis von 0,29 W/(m²K), also dicht an der tatsächlichen Ausführung. Das tatsächliche A/V_e-Verhältnis liegt bei 0,48 m⁻¹. In der Originalberechnung des Energieausweises wurden für das Gebäude CO₂-Emissionen in Höhe von 10,2 kg CO₂-Äquivalent/(m²a) ermittelt.

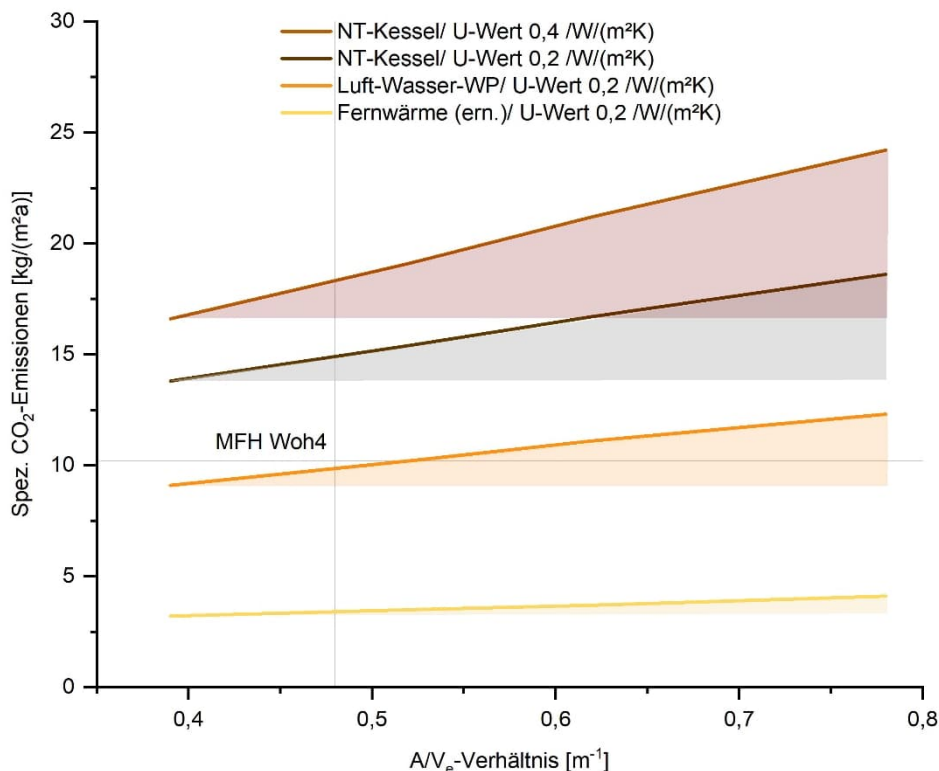


Bild 6.2.9: Einfluss des A/V_e-Verhältnisses auf die spez. CO₂-Emissionen

Die Grafik in Bild 6.2.9 zeigt anschaulich, dass der Einfluss des A/V_e-Verhältnisses bei einer hohen Qualität der Gebäudehülle in Kombination mit effizienter Anlagentechnik kaum noch ins Gewicht fällt. Bei Mehrfamilienhäusern liegt das A/V_e-Verhältnis in der Regel zwischen 0,3 und 0,5 m⁻¹.

6.2.3 Ergebnisse Bürogebäude Bue4

Im Gegensatz zu Wohngebäuden werden die spezifischen Transmissionswärmeverluste bei Nichtwohngebäuden nicht gesondert ausgewiesen, daher wird das Bürogebäude unabhängig von den Mehrfamilienhäusern betrachtet. Bei dem Bürogebäude handelt es sich um ein Mustergebäude mit einer typischen Zonierung. Die wesentlichen Kenndaten sind in Tabelle 34 aufgelistet. Die Angaben beziehen sich auf den thermisch konditionierten Bereich.

Tabelle 34: Wesentliche Kenndaten des Bürogebäudes

| | |
|-----------------------------------|------------------------|
| Nettovolumen V | 5.979,0 m ³ |
| Nettogrundfläche A _{NGF} | 1.676,2 m ² |
| Thermische Hüllfläche | 2.749,6 m ² |
| Geschosshöhe | 3,70 m |

In Tabelle 35 bis Tabelle 38 sind die Ergebnisse für die verschiedenen Dämmstandards bei einer Beheizung mit unterschiedlichen Heizsystemen für das untersuchte Bürogebäude zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 35: Ergebnisübersicht für Bue4; Beheizung mit Niedertemperaturkessel (Erdgas)

| | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | | | | |
|---|--|--------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 1 |
| spez. Nutzenergiebedarf gesamt [kWh/(m ² a)] | 69,6 | 73,7 | 77,8 | 85,7 | 93,5 | 101,2 | 116,7 | 139,7 |
| spez. Endenergiebedarf gesamt [kWh/(m ² a)] | 106,5 | 112,4 | 118,3 | 129,6 | 140,9 | 152 | 174,2 | 207,5 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 115,59 | 121,46 | 127,34 | 138,6 | 149,83 | 160,9 | 182,95 | 215,98 |
| spez. Nutzenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² a)] | 64,5 | 68,6 | 72,6 | 80,6 | 88,4 | 96,1 | 111,6 | 134,6 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 27,3 | 28,6 | 29,9 | 32,3 | 34,8 | 37,2 | 42 | 49,3 |

Tabelle 36: Ergebnisübersicht für Bue4; Beheizung mit Luft-Wasser-Wärmepumpe (Strom)

| | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | | | | |
|---|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 1 |
| spez. Nutzenergiebedarf gesamt [kWh/(m ² a)] | 69,6 | 73,7 | 77,8 | 85,7 | 93,5 | 101,2 | 116,7 | 139,7 |
| spez. Endenergiebedarf gesamt [kWh/(m ² a)] | 32,6 | 33,9 | 35,1 | 37,6 | 40 | 42,4 | 47,2 | 54,4 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 58,67 | 60,98 | 63,26 | 67,71 | 71,94 | 76,28 | 84,92 | 97,83 |
| spez. Nutzenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² a)] | 64,5 | 68,6 | 72,6 | 80,6 | 88,4 | 96,1 | 111,6 | 134,6 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 18,3 | 19 | 19,7 | 21,1 | 22,4 | 23,7 | 26,4 | 30,4 |

Tabelle 37: Ergebnisübersicht für Bue4; Beheizung mit Fernwärme (Heizwerk, fossil)

| | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | | | | |
|---|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 1 |
| spez. Nutzenergiebedarf gesamt [kWh/(m ² a)] | 69,6 | 73,7 | 77,8 | 85,7 | 93,5 | 101,2 | 116,7 | 139,7 |
| spez. Endenergiebedarf gesamt [kWh/(m ² a)] | 84,1 | 88,6 | 93 | 101,7 | 110,2 | 118,7 | 135,5 | 160,7 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 115,46 | 121,29 | 127,04 | 138,29 | 149,41 | 160,41 | 182,33 | 215,14 |
| spez. Nutzenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² a)] | 64,5 | 68,6 | 72,6 | 80,6 | 88,4 | 96,1 | 111,6 | 134,6 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 28,4 | 29,7 | 31,1 | 33,7 | 36,3 | 38,8 | 43,9 | 51,4 |

Tabelle 38: Ergebnisübersicht für Bue4; Beheizung mit Fernwärme (KWK, erneuerbar)

| | Mittlerer U-Wert Außenbauteile (ohne Fenster) [W/(m ² K)] | | | | | | | |
|---|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 1 |
| spez. Nutzenergiebedarf gesamt [kWh/(m ² a)] | 69,6 | 73,7 | 77,8 | 85,7 | 93,5 | 101,2 | 116,7 | 139,7 |
| spez. Endenergiebedarf gesamt [kWh/(m ² a)] | 84,1 | 88,6 | 93 | 101,7 | 110,2 | 118,7 | 135,5 | 160,7 |
| spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)] | 21,86 | 21,89 | 21,93 | 21,99 | 22,06 | 22,12 | 22,24 | 22,42 |
| spez. Nutzenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² a)] | 64,5 | 68,6 | 72,6 | 80,6 | 88,4 | 96,1 | 111,6 | 134,6 |
| spez. CO ₂ -Emissionen [kg/(m ² a)] | 9,7 | 9,9 | 10,1 | 10,4 | 10,8 | 11,1 | 11,8 | 12,9 |

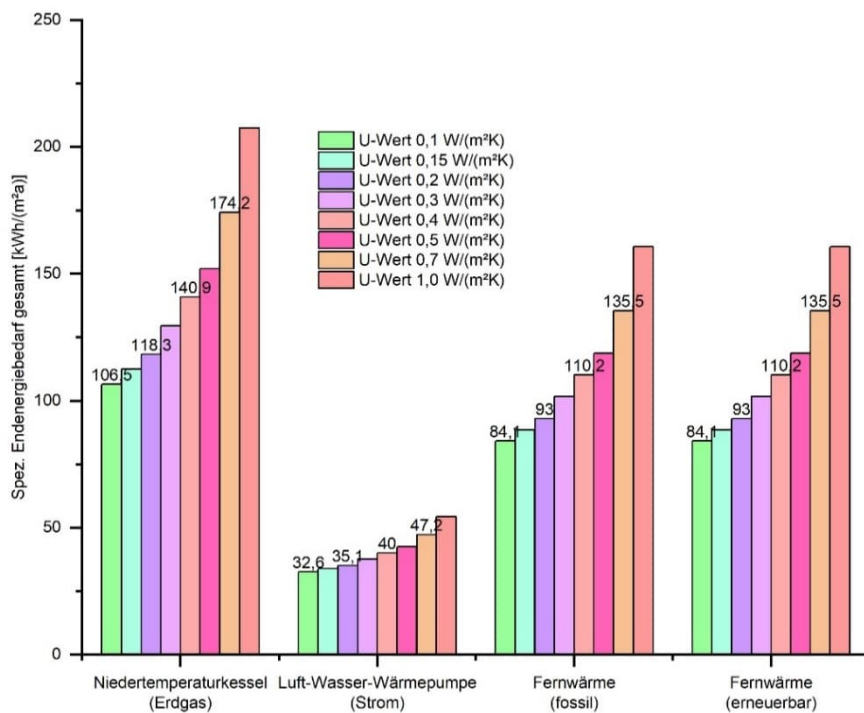


Bild 6.2.10: Spez. Endenergiebedarf für das Bürogebäude Bue4 bei unterschiedlicher Anlagentechnik mit verschiedenen Dämmstandards

Bild 6.2.11 zeigt die CO₂-Emissionen, die jährlich durch den Betrieb des Bürogebäudes entstehen. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Heizungssystemen sind auch hier erheblich und entsprechen qualitativ den Ergebnissen der betrachteten Mehrfamilienhäuser.

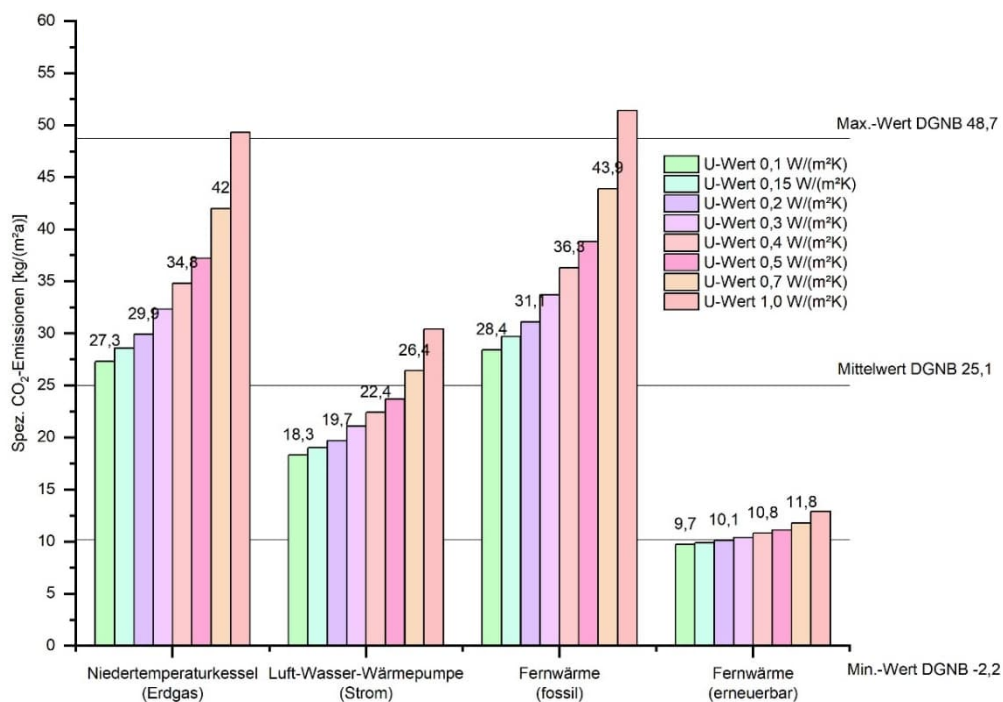


Bild 6.2.11: Spezifische CO₂-Emissionen für das Bürogebäude Bue4 bei unterschiedlicher Anlagentechnik mit verschiedenen Dämmstandards

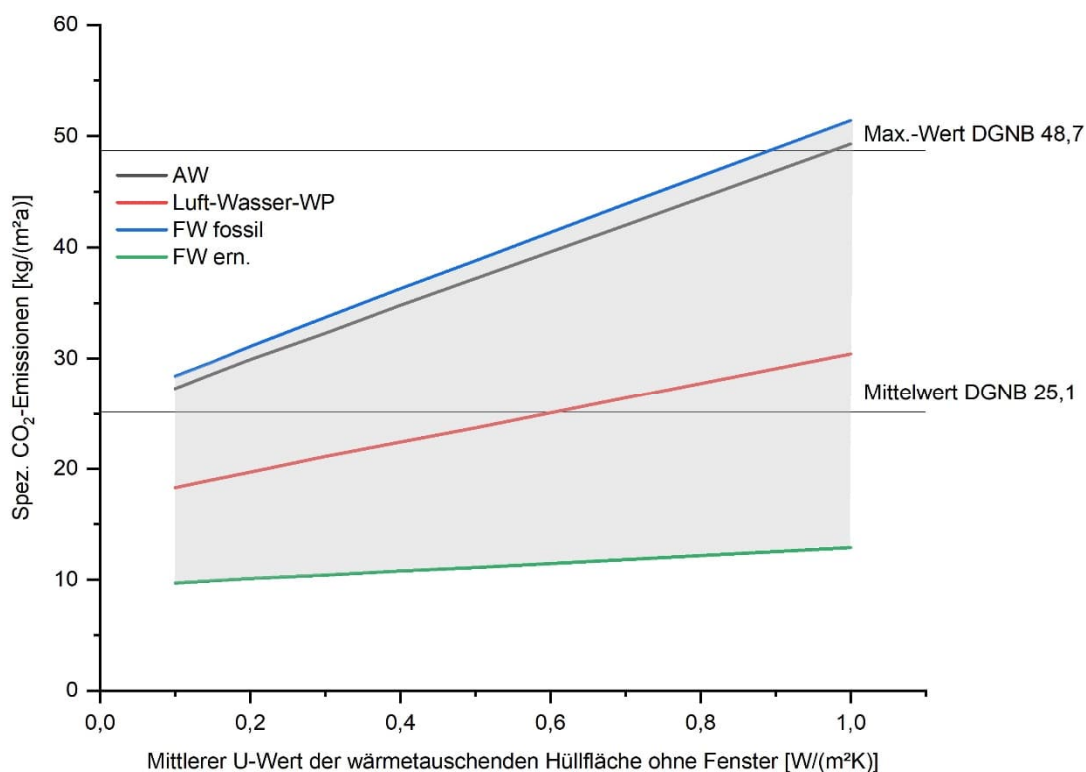


Bild 6.2.12: Spez. CO₂-Emissionen in Abhängigkeit des mittleren U-Wertes der wärmetauschenden Hüllfläche (ohne Fenster) für unterschiedliche Heizsysteme Bue4

Bild 6.2.12 zeigt die CO₂-Emissionen für verschiedene Heizsysteme in Abhängigkeit des mittleren U-Wertes (ohne Fenster). Je schlechter die Qualität der Gebäudehülle ist, desto größer wird der Einfluss des Heizsystems in Bezug auf die entstehenden Emissionen. Deutlich wird vor allem, dass bei Verwendung eines Heizsystems mit fossilen Brennstoffen die Verbesserung der Gebäudehülle allein nicht ausreicht, um die Emissionen signifikant zu reduzieren (NT-Kessel und FW fossil).

6.3 Zusammenfassung und Ausblick

In der Untersuchung zu Emissionen aus dem Gebäudebetrieb wurde im Wesentlichen der Einfluss der wärmetauschenden Hüllfläche während der Betriebsphase untersucht, da bei diesen Bauteilen ein direkter Zusammenhang zwischen den Emissionen für die Herstellung und den aus Transmissionswärmeverlusten resultierenden Emissionen besteht.

Die jährlich ermittelten Emissionen im Betrieb entstehen im Gegensatz zur Errichtung nicht nur einmalig, sondern dauerhaft. Wenn es künftig möglich wird, Gebäude nahezu emissionsfrei zu betreiben, z.B. durch die Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom, gehen die Emissionen im Betrieb auf nahezu Null zurück, so dass der Wahl der verwendeten Baustoffe eine deutlich höhere Bedeutung zukommt.

Die energetische Einstufung von Gebäuden auf Basis der benötigten Primärenergie und der daraus resultierenden Emissionen kann unter Umständen dazu führen, dass Gebäude mit schlechteren Energiestandards durch die Verwendung von primärenergetisch günstigen Versorgungssystemen besser abschneiden, als effiziente Gebäude mit unvorteilhafterer Energieversorgung (siehe z.B. Bild 6.2.2). So könnten beispielsweise Quartiere in Städten, die an

eine klimaneutrale Nah- oder Fernwärmeversorgung angeschlossen sind, insgesamt als klimaneutral eingestuft werden, obwohl die Gebäude einen durchaus hohen Endenergiebedarf besitzen. Damit wird zwar das Ziel der Klimaneutralität erreicht, aber weiterhin hohe Verbrauchskosten könnten bei insgesamt steigenden Energiepreisen zu sozialen Problemen führen.

Um eine flächendeckende Versorgung mit regenerativen Energien sicherzustellen, hilft es vor allem insbesondere in der Ausbauphase, wenn der Verbrauch von Gebäuden so niedrig wie möglich ist. Insgesamt zeigt sich aber, dass eine stetige Erhöhung der Dämmstandards nicht mehr zur CO₂-Einsparung beiträgt, sondern ab einem bestimmten Punkt die Höhe der Emissionen zur Herstellung der benötigten (Dämm-)Materialien die mögliche Einsparung im Betrieb überschreitet. Daher sollte bei künftigen Gesetzesvorlagen auf eine weitere Verschärfung der U-Werte verzichtet werden, vor allem auch in Hinblick auf die steigenden Baukosten. Den weitaus größeren Einfluss auf die entstehenden Emissionen im Betrieb hat die verwendete Anlagentechnik.

Die Ressourceninanspruchnahme von Bauwerken wird derzeit vor allem im Rahmen von Zertifizierungsprozessen geprüft, z.B. beim Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude QNG. Die Ermittlung der Emissionen der Baukonstruktion ist sehr aufwändig und damit kostenintensiv.

Im Hinblick auf den Ausbau der erneuerbaren Energien ist davon auszugehen, dass insbesondere der Primärenergie- und der Emissionsfaktor für Strom in den kommenden Jahren deutlich sinken werden. Da Schleswig-Holstein zu einem der größten Erzeuger regenerativen Stroms zählt, ist der Einsatz strombetriebener Versorgungssysteme daher für den Gebäudebetrieb mehr als sinnvoll und sollte in Kombination mit einer gut gedämmten Gebäudehülle in der kommunalen Wärmeplanung vorrangig berücksichtigt werden.

7 Zusammenfassung

Durch Bauprozesse werden ein Großteil der zur Verfügung stehenden Ressourcen verbraucht und immense Mengen an CO₂ ausgestoßen. In Deutschland entfallen fast 40 % des gesamten Energiebedarfs und ca. 1/3 der CO₂-Emissionen auf die Herstellung und Nutzung von Gebäuden, aktuelle Recherchen von Weidner et al. (2021) [1] und Sobek (2022) [2] u. a. gehen sogar eher von 50 % aus. Bisherige Einsparmaßnahmen, wie die Energieeinsparverordnung (EnEV) und das Gebäudeenergiegesetz (GEG) zielen ausschließlich auf den Betrieb von Gebäuden. Dadurch, dass für die CO₂-Emission, die aus der Erstellung der Gebäudekonstruktion entsteht, der sogenannten „grauen Emission“ keinerlei Planungshilfen bzw. Zielvorgaben bestehen, spielt deren Reduzierung in der Planung und Ausführung im Bauwesen zurzeit nahezu keine signifikante Rolle. Auch in Bewertungsverfahren zur Nachhaltigkeit, dieses sind in Deutschland im Regelfall das BNB-Zertifizierungsverfahren (BNB = Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen) für Bundesbauten und das DGNB-Verfahren (DGNB = Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen) für privatwirtschaftliche oder auch kommunale Gebäude, ist der gesamte Komplex der Ökologie nur ein Gesichtspunkt neben anderen Bereichen wie ökonomische und soziokulturelle Nachhaltigkeit, und der konkrete Anteil der „grauen Emission“ als ein Parameter der ökologischen Qualität, hat nur einen marginalen Einfluss von 3,375 % auf die Gebäudebewertung.

Vor dem o. g. Hintergrund wurden im Rahmen des hier dokumentierten Forschungsvorhaben folgende Punkte bearbeitet:

1. Es wurden CO₂-Bilanzen an 12 landestypischen Hochbauwerken durchgeführt, um einen Überblick bzw. Transparenz über die CO₂-Emission / der „grauen Emission“ typischer Hochbaukonstruktionen zu schaffen. In die Analyse wurden ergänzend in der Literatur dokumentierte CO₂-Berechnungen einbezogen.
2. Basierend auf den eigenen und den in der Literatur dokumentierten Berechnungen wurden die Haupt-CO₂-Treiber herausgearbeitet und hier Optimierungsvorschläge erarbeitet.

Die wesentlichen Ergebnisse des Projektes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- (1) Bei üblichen, in Massivbauweise errichteten Hochbauten werden hinsichtlich der grauen Emission etwa 500 – 700 kgCO₂/m² NRF bzw. 100 – 180 kgCO₂/m³ BRI für die Gebäudekonstruktion (KG 300) emittiert. Unter Berücksichtigung der grauen Emission der technischen Anlagen ergeben sich Werte von ca. 600 – 900 kgCO₂/m² NRF bzw. ca. 120 – 220 kgCO₂/m³ BRI.
 Umgerechnet auf eine Nutzungsdauer des Bauwerks von 100 Jahren sind dieses 5,0 – 7,0 kgCO₂/(m²_{NRF}·a) bzw. 1,0 – 1,8 kgCO₂/(m³_{BRI}·a) für die Gebäudekonstruktion bzw. Werte zwischen 6,0 – 9,0 kgCO₂/(m²_{NRF}·a) bzw. 1,2 – 2,2 kgCO₂/(m³_{BRI}·a) wenn ergänzend die technischen Anlagen mitberücksichtigt werden.
- (2) Der wesentliche Anteil der CO₂-Emission fällt in der Phase A (Herstellung und Errichtung, Module A1 bis A5) an, wobei der zentrale CO₂-Treiber die Produktion der Baustoffe und Bauelemente ist. Im Mittel werden alleine für die Gebäudekonstruktion in der Phase A etwa 350 kgCO₂/m² NRF bzw. 90 kgCO₂/m³ BRI emittiert. Unter Berücksichtigung der technischen Anlagen (TGA) erhöht sich dieser Wert nochmals um 20–30 %, auf 430 kgCO₂/m² NRF bzw. 110 kgCO₂/m³ BRI.

Die ermittelten Werte liegen damit etwa dreifach höher, als der von [1] ermittelte Maximalwert von 32 kgCO₂/m³ BRI, der zur Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaabkommens nicht überschritten werden darf.

- (3) Aufgrund der Vielzahl der Bauteile gibt es in der CO₂-Bilanz nicht „den Einen“ Haupt-CO₂-Treiber, mit entsprechendem Abstand sind die folgenden Bauteile jedoch für die größte CO₂-Emission verantwortlich:
- Die Rohbaudecken (ca. 30 % der CO₂-Emission des Rohbaus);
 - Die Fußbodenaufbauten inklusive Bodenbeläge; bei der Ersterstellung in der Bau-phase A sind dieses zwar lediglich ca. 15 % der gesamten CO₂-Emission der Bau-konstruktion; über die gesamte Lebensdauer wächst der Wert jedoch auf etwa 26 % an.
- (4) Die jährlich ermittelten Emissionen im Betrieb entstehen im Gegensatz zur Errichtung nicht nur einmalig, sondern dauerhaft. Wenn es künftig möglich wird, Gebäude nahezu emissionsfrei zu betreiben, z.B. durch die Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom, gehen die Emissionen im Betrieb auf nahezu Null zurück, so dass der Wahl der verwen-deten Baustoffe eine deutlich höhere Bedeutung zukommt.

Bei einem Gebäude mit einem mittleren U-Wert im Bereich von 0,2 bis 0,4 W/(m²K), das damit die Anforderungen der geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV) bzw. des Ge-bäudeenergiegesetzes (GEG) erfüllt, ist der CO₂-Ausstoß aus dem Betrieb unter den ak-tuellen Umständen noch überwiegend, im Vergleich zu den „grauen Emissionen“, die auf die Erstellung des Bauwerks zurückzuführen sind. Das Verhältnis liegt derzeit bei etwa 60-75 % für den Betrieb zu 40-25 % für die Konstruktion, einschließlich der technischen Anlagen.

- (5) Zur Reduzierung der CO₂-Emission aus der Gebäudekonstruktion werden folgende Maßnahmen vorgeschlagen:
- Erhöhung der Lebensdauer der Bauwerke bzw. Reduzierung von Nutzflächen. Die-ses erfordert einerseits langlebige Konstruktionen, aber genauso auch alternative bzw. flexible Gebäudekonzepte.
 - Generelle Auswahl von Produkten mit geringer CO₂-Emission. Dieses betrifft grund-sätzlich alle Baustoffe, die wesentlichen Einsparpotentiale werden allerdings bei Be-ton bzw. Zement, Estrich, Bodenbelägen und Dämmstoffen gesehen.
 - Auch wenn die Einsparungen laut den eigenen Untersuchungen nicht ganz so dras-tisch ausfallen, wie vielfach publiziert, kann durch Teilersatz der massiven Baukon-struktion durch Holzbauweise ebenfalls CO₂ eingespart werden.

In Summe sind durch die o g. Maßnahmen CO₂-Einsparungen von etwa 30 % möglich. Entscheidend hierbei ist jedoch, dass eine CO₂-Einsparung eingefordert wird. Dieses kann nur durch das Einpreisen eines CO₂-Preises bzw. Klimafolgekosten erfolgen oder aber ein Bonus-Malus-System auf Basis von CO₂-Werten mit der Definition von entspre-chenden CO₂-Grenzwerten. Hierzu können die unter (1) aufgeführten Werte eine Grund-lage bilden.

Die in den Abschnitten 1 bis 5 dargestellten Berechnungen wurden an der Fachhochschule Kiel im Bereich Massivbau von Herrn Professor Dr. Görtz bzw. Frau Pham, M. Sc. durchge-führt bzw. dokumentiert.

Die im Abschnitt 6 dargestellten Vergleichsrechnungen, welche CO₂-Emission aus dem Ge-bäudebetrieb zu erwarten ist, erfolgten von Frau Prof. Dr. Gerder-Rohkamm, Professorin für Green Building und Bauphysik an der Fachhochschule Kiel.

Die Zuarbeit hinsichtlich Bauwerksunterlagen inklusive einer fachlichen Diskussion der Vorgehensweise sowie der Ergebnisse erfolgte durch bzw. mit den Praxispartnern, der Gebäudemangement Schleswig-Holstein AöR (GMSH) / Dipl.-Ing. Hagelgans, den bbb : architekten bda / Dipl.-Ing. Friedrichs bzw. Dipl.-Ing. Opfermann sowie dem Ingenieurteam TREBES / Dr.-Ing. Simon Kern.

Kiel, den 21.02.2025

gez.

Prof. Dr.-Ing. Stephan Görtz

Prof. Dr.-Ing. Frauke Gerder-Rohkamm

Thi Kim Dung Pham, M. Sc.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Weidner, S. et al. (2021) *Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien* in: Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 12, S. 969–977.
<https://doi.org/10.1002/best.202100065>
- [2] Sobek, W. (2022) *Non nobis – über das Bauen in der Zukunft – Ausgehen muss man von dem, was ist*. 3. Aufl. Stuttgart: avedition.
- [3] ARGE//eV (2024) *Wohnungsbau 2024 in Deutschland: Kosten - Bedarf - Standards – Die Krise als Einbahnstraße?*
- [4] Anna Braune; Levan Ekhvaia; Kathrin Quante (August 2021) *Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion – Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden*.
https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-ev/de/themen/Klimaschutz/Toolbox/102021_Studie-Benchmarks-fuer-die-Treibhausgasemissionen-der-Gebaeudekonstruktion.pdf.
- [5] DIN EN 15978-1 (September 2021) *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden Teil 1: Umweltqualität*. Berlin: Beuth Verlag.
- [6] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung *Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG)* [online]. <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/beg/> [Zugriff am: 1. Nov. 2024].
- [7] DIN EN ISO 14040 (Februar 2021) *Umweltmanagement Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [8] DIN EN ISO 14044 (Februar 2021) *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [9] DIN 276 (Dezember 2018) *Kosten im Bauwesen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [10] DIN 277 (August 2021) *Grundflächen und Rauminhalt im Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag.
- [11] DIN EN 15804 (März 2022) *Nachhaltigkeit von Bauwerken Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Berlin: Beuth Verlag.
- [12] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2024) *ÖKOBAUDAT - Informationsportal Nachhaltiges Bauen* [online]. <https://www.oekobaudat.de/> [Zugriff am: 16. Sep. 2024].
- [13] Weißenberger, M. (2016) *Lebenszyklusbasierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik* [Dissertation]. Technische Universität München / Hochschule München.
- [14] Schneider-Marin, P. et al. (2019) *Design2 Eco Lebenszyklusbetrachtung im Planungsprozess von Büro- und Verwaltungsgebäuden - Entscheidungsgrundlagen und Optimierungsmöglichkeiten für frühe Planungsphasen*.
- [15] Mahler, B. et al. (2019) *Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus*.
- [16] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (01.03.2023) *Anhang 3.1.1 zur ANLAGE 3 - Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude*.
- [17] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (01.03.2023) *Anhang 3.2.1.1 zur Anlage 3 - Bilanzierungsregeln des QNG für Nichtwohngebäude*.

-
- [18] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2023) *Ökobilanzierung Rechenwerte 2023 Version 1.3* [online]. <https://www.qng.info/aktualisierte-version-der-tabelle-oekobilanzierung-rechenwerte-2023-und-sonderberechnungsvorschrift-fernwaerme-veroeffentlicht/>.
- [19] ISO 15686-1 (Mai 2011) *Hochbau und Bauwerke - Planung der Lebensdauer - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Rahmenbedingungen*. Geneva (CH): ISO Copy Right Office.
- [20] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Februar 2017) *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)* [online]. https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_%C3%84nderungs%C3%BCbersicht_2017-02-24.pdf.
- [21] Thomas Zelger et al. (Oktober 2009) *Erweiterung des OI3-Index um die Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen*.
- [22] Ulrich Agethen et al. (2019) *Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte – Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe*.
- [23] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung *Prozess-Datensatz: Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) - Thünen-Institut für Holzforschung* [online]. https://oekobaudat.de/OEKO-BAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=7aba3603-0689-4da5-8d24-fd92ae398d07&version=00.00.032&stock=OBD_2024_I&lang=de [Zugriff am: 1. Nov. 2024].
- [24] Hoxha, E. et al. (2020) *Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods* in: *Buildings and Cities* 1, H. 1, S. 504–524. <https://doi.org/10.5334/bc.46>
- [25] Francesco Cherubini et al. (2012) *Climate impact of forest bioenergy: contributions from biogenic CO₂ and albedo*.
- [26] Guest, G.; Cherubini, F.; Strømman, A. H. (2013) *Global Warming Potential of Carbon Dioxide Emissions from Biomass Stored in the Anthroposphere and Used for Bioenergy at End of Life* in: *Journal of Industrial Ecology* 17, H. 1, S. 20–30. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x>
- [27] Andreas Windsperger; Bernhaard Windsperger (Mai 2015) *CO₂-Bilanzierung von Bauprodukten - Aktuelle Praxis der Klimabewertung von Holz- und Massivbaustoffen - Überlegungen zu neuen methodischen Ansätzen der Bilanzierung*.
- [28] Graubner, C.-A.; Pohl, S. (2014) *Nachhaltigkeit von mehrgeschossigen Wohngebäuden aus Mauerwerk*.
- [29] Agora (2020) *Klimaneutrales Deutschland – Studie: In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals*.
- [30] Deutsche Energie-Agentur GmbH (2018) *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende – Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050 Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen*. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9262_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_Ergebnisbericht.pdf.
- [31] Fraunhofer (November 2013) *Energiesystem Deutschland 2050*.
- [32] FutureCamp; DECHEMA (September 2019) *Roadmap Chemie 2050*.

- [33] Heckmann, M.; Glock, C. (2023) *Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme* in: Beton- und Stahlbetonbau 118, H. 2, S. 110–123.
<https://doi.org/10.1002/best.202200102>
- [34] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (August 2024) *DAfStb-Richtlinie Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton*.
- [35] DIN 4109-5 (August 2020) *Schallschutz im Hochbau - Teil 5: Erhöhte Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [36] DIN 4109-1 (Januar 2018) *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [37] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2024) *Gebäudeenergiegesetz (GEG)* [online]. https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage_7.html [Zugriff am: 1. Nov. 2024].
- [38] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung *Prozess-Datensatz: Kalksandstein - Generic Dataset* [online]. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). <https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c916ceb3-a44d-40b7-8984-861afa589956&version=20.24.070>.
- [39] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung *Prozess-Datensatz: Kalksandstein - Average Dataset - Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V.* [online]. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=cc0d7baa-755a-4a4a-baf3-4fe53d68a041&version=00.02.000&stock=OBD_2024_I&lang=de [Zugriff am: 1. Nov. 2024].
- [40] Walther, H. B. (2024) *Nachweis der Rückbindung von CO₂ in Kalksandstein durch Rekarbonatisierung* in: Bautechnik 101, H. 12, S. 737–749. <https://doi.org/10.1002/bate.202400017>
- [41] CEMWOOD GmbH (Oktober 2023) *Firmen-EPD - Trockenschüttung - CEMWOOD Ausgleichschüttungen CW*.
- [42] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2024) *Broschüre Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen*. 13. Aufl.
- [43] Holm, A.; Ivanica, R.; Schmidt, W. (August 2022) *Einfluss der Dämmung auf das Treibhauspotential (GWP) und den nicht erneuerbaren Primär-energieaufwand (PENRT) über den gesamten Gebäudelebenszyklus unter Berücksichtigung verschiedener Effizienzstandards am Beispiel eines Einfamilienhauses, eines Mehrfamilienhauses und einer Lagerhalle. Vergleich mit den Anforderungen des Qualitätssiegels Nachhaltige Gebäude (QNG)*.
- [44] Deutscher Bundestag (Juli 2022) *Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728) – das durch Artikel 18a des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1237) geändert worden ist*.
- [45] (2024) *ZUB Helena* [Software]. <https://www.zub-systems.de/de/produkte/helena> [Zugriff am: 2. Dez. 2024].
- [46] Thomas Holtz (Dezember 2021) *Energieberatungsbericht SH Hasloh Neue Mitte MFH*.