

Hochschule für Technik Stuttgart

CO₂-Bilanzierung und Wirtschaftlichkeit von Holzaufstockungen auf Bürogebäuden

Bachelor-Arbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

in Wirtschaftsingenieurwesen Bau und Immobilien

vorgelegt von
Mier Ali
Matrikelnummer
1002891

bei
Prof. Dr.-Ing. Kai Kürschner
Zweitgutachter
M. Eng. Marcel Stark

Eingereicht am 02.01.2025

Abstract

Der Fokus dieser Forschungsarbeit liegt darauf, das Aufstockungspotenzial einer Holzaufstockung im Vergleich zu konventionellen Bauweisen mittels einer CO₂-Bilanzierung und einer Wirtschaftlichkeitsberechnung zu untersuchen. Dazu wird folgende Forschungsfrage gestellt ‚Kann eine Aufstockung in der Holzbauweise die Lösung für eine nachhaltige Nachverdichtung bilden?‘.

Die CO₂-Bilanzierung wurde an verschiedenen Wand- und Deckenvarianten im Holz- und im Massivbau durchgeführt. Daraufhin erfolgten die Berechnung und der Vergleich des Gewichts, da dieses bei Aufstockungen ein wesentliches Entscheidungskriterium bildet. Anschließend wurden die Varianten in ihrer Wirtschaftlichkeit verglichen. Auch der Einfluss einer CO₂-Bepreisung wurde auf Grundlage der Materialkostenermittlung ermittelt.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse ergab, dass die Massivbauweise eine deutlich höhere Umweltbelastung verursacht, jedoch wirtschaftlich gegenüber den Holzbauvarianten im Vorteil bleibt. Gleichzeitig weist der Holzbau das niedrigste globale Erwärmungspotenzial auf, wobei er sich aufgrund seines geringen Eigengewichts besonders für Aufstockungen auf Bestandsgebäuden eignet.

Inhaltverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung.....	1
1.2 Fragestellung	2
1.3 Zielsetzung	2
1.4 Vorgehensweise	2
2 Grundlagen	4
2.1 Allgemeines	4
2.1.1 Klimawandel	4
2.1.2 Anteil des Gebäudesektors am Klimawandel	5
2.1.3 CO ₂ -Bilanzierung	7
2.1.4 Lebenszyklusphasen	8
2.1.5 Cradle to Gate, Grave, und Cradle	9
2.2 Bauen in der Zukunft.....	9
2.2.1 Vertikale Nachverdichtung.....	9
2.2.2 Nachhaltigkeit	11
2.2.3 Potenziale einer Aufstockung mit Holz	13
2.2.4 Holzbauweisen im Überblick.....	14
3 Fallbeispiel	15
3.1 Projektvorstellung	15
3.2 Vereinfachte Randbedingungen.....	16
4 Aufstockungsvarianten	19
4.1 Statischer Entwurf.....	19
4.2 Varianten im Holzbau.....	19
4.2.1 Holztafelbauwand	19
4.2.2 Brettschichtholz wand.....	20
4.2.3 Brettsperrholzwand.....	20
4.2.4 Brettsperrholzdecke.....	21
4.2.5 Brettschichtholzdecke	21
4.2.6 Lignatur-Kastendecke.....	22
4.2.7 Holzbetonverbunddecke	22
4.3 Varianten im Massivbau.....	23
4.3.1 Stahlbeton mit Normalbeton	23
4.3.2 Stahlbeton mit Ökobeton	23

4.3.3 Stahlbeton mit Recyclingbeton	24
4.3.4 Spannbeton-Fertigdecke	24
5 CO₂-Bilanzierung	25
5.1 Festlegung des Ziel- und Untersuchungsrahmens.....	25
5.2 Erstellung einer Sachbilanz	25
5.2.1 Datengrundlage	25
5.2.2 Mengenermittlung	26
5.3 Wirkungsabschätzung der CO ₂ -Bilanz.....	31
5.3.1 Vorgehensweise bei den Berechnungen	31
5.3.2 Holzbauwände	32
5.3.3 Holzbaudecken	34
5.3.4 Massivwände	37
5.3.5 Massivdecken	40
5.4 Gegenüberstellung der GWP-Ergebnisse.....	43
5.4.1 Wände	43
5.4.2 Decken	45
5.5 Gewichtsvergleich.....	46
5.5.1 Wände	46
5.5.2 Decken	47
6 Wirtschaftlichkeit und CO₂-Bepreisung	49
6.1 Materialkostenermittlung der Aufstockungsvarianten.....	49
6.1.1 Berechnungsmodell	49
6.1.2 Materialkostenübersicht.....	49
6.1.3 Holzbauwände	50
6.1.4 Holzbaudecken	51
6.1.5 Massivwände	53
6.1.6 Massivdecken	54
6.2 CO ₂ -Bepreisung und Gesamtkosten.....	56
6.2.1 Wandvarianten	57
6.2.2 Deckenvarianten.....	57
6.3 Gesamtkostenübersicht	58
6.3.1 Wandvarianten	58
6.3.2 Deckenvarianten.....	60
7 Zusammenfassung und Ausblick	61
7.1 Zusammenfassung	61

7.2 Ausblick	65
Anhang	VI
Literaturverzeichnis	XIX
Internetquellen	XXI
Abbildungsverzeichnis	XXIV
Tabellenverzeichnis	XXVI
Abkürzungsverzeichnis	XXVII
Selbständigkeitserklärung	XXVIII
Sperrvermerk	XXVIII

1 Einführung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Das im Pariser Klimaabkommen vereinbarte Ziel der europäischen Mitgliedsstaaten besteht darin, die Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen. Mit dem Entwurf eines verschärften Klimaschutzprogramms der Bundesregierung soll Deutschland bis zum Jahr 2045 schrittweise zur Treibhausgasneutralität geführt werden. Mit der neuesten Novellierung des Bundes-Klimaschutzgesetzes liegt die Reduktion der nationalen Treibhausgasausstoße insgesamt in der sektorübergreifenden Gesamtverantwortung und nicht wie bisher in der Eigenverantwortung einzelner Sektoren. Der Fokus wird auf die Bereiche gerichtet, in denen die größten Einsparpotenziale vorhanden sind.¹

Das **Bauwesen** verantwortet geschätzt 50 % aller klimaschädlichen Emissionen weltweit und verursacht damit einen großen Anteil des Klimawandels. Der CO₂-Ausstoß des **Gebäudesektors** wird in betriebsbedingte Emissionen, die in der Nutzungsphase entstehen, und konstruktionsbedingte bzw. **graue Emissionen** aufgeteilt, die in der Herstellungsphase emittiert werden.² Betriebsbedingte Emissionen können durch Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien bis auf null reduziert werden, womit die Reduktion konstruktionsbedingter Emissionen in den Fokus rückt. Die Auswahl von Materialien mit geringem Treibhauspotenzial und einer hohen Materialeffizienz ist ausschlaggebend für die Nachhaltigkeit von Bauwerken.³ Die Knappheit an Ressourcen und die begrenzte Bauflächenverfügbarkeit regen zu einem Umdenken in der Bauwirtschaft hinsichtlich der Entscheidung an, ob künftig ‚auf grüner Wiese‘ gebaut oder mit dem verfügbaren **Gebäudebestand** umgebaut, saniert bzw. **vertikal nachverdichtet** werden soll. In den folgenden Kapiteln werden die Potenziale einer **Holzaufstockung** als ressourcenschonende und klimaeffiziente Nachverdichtung mit dem Instrument einer **CO₂-Bilanzierung** untersucht sowie bewertet.

¹ Vgl. Bundesregierung: Neues Klimaschutzgesetz ist in Kraft, 17.07.2024, (URL 1) (24.11.2024, 21:16).

² Vgl. Weidner, Stefanie et al.: Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien, in: Beton- und Stahlbetonbau, 2021, Band 116, Ausgabe 12, S. 969.

³ Vgl. Kürschner, Kai: Nachhaltige und ressourceneffiziente Geschossbauten, Kapitel 3, Stuttgart, 2024, S. 8–11.

1.2 Fragestellung

Die Forschungsfrage dieser Arbeit lautet: Kann eine Aufstockung in der Holzbauweise die Lösung für eine nachhaltige Nachverdichtung bilden? Für die Antwortfindung werden die CO₂-Bilanz und die Wirtschaftlichkeit von verschiedenen Aufstockungsvarianten auf einem Bürogebäude bewertet. Das Augenmerk liegt bei der Untersuchung auf der Ausführung in der Holzbauweise. Diese wird der konventionellen Bauweise in Stahlbeton gegenübergestellt. Anhand eines konkreten Projektbeispiels in Stuttgart Bad Cannstatt wird eine fiktive Aufstockung untersucht.

1.3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit bildet es, die Klimateffizienz einer Holzaufstockung in Zahlen kenntlich zu machen und einer konventionellen Aufstockung in Stahlbeton gegenüberzustellen, wobei auch das Zusammenspiel der beiden Varianten im Vergleich berücksichtigt wird. Ein Zielergebnis sollte darin bestehen, die Wirtschaftlichkeit der Aufstockungsvarianten zu erfassen und zu prüfen, inwiefern sich diese voneinander abheben. Dieser Vergleich soll als Referenz für künftige Projekte dienen und dazu führen, dass die CO₂-Bilanz von Bauwerken als Kriterium in die Entscheidungsgrundlage von Bauherren aufgenommen wird sowie bei der Entscheidungsfindung zwischen Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit abgewogen wird.

1.4 Vorgehensweise

In dieser Arbeit wird die Ausführung in der Holzbauweise bezüglich ihrer ökologischen und ökonomischen Effizienz mit der Massivbauweise verglichen. Zunächst wird anhand eines Projektbeispiels der Bereich eingegrenzt, in dem fiktiv in verschiedenen Varianten aufgestockt werden soll. Sowohl für die Aufstockungsvariante in der Holz- und Holzhybridbauweise als auch für die Version in der Massivbauweise werden mehrere Ausführungsvarianten für Wände und Decken ausgewählt. Diese werden hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit und ihrer Kosten verglichen. Als Grundlage der Materialmengerermittlung werden statische

Annahmen zur Bestimmung der Bauteildicken getroffen. Auf dieser Basis werden die Materialmengen und die Massen der unterschiedlichen Wand- sowie Deckensysteme ermittelt. Daraufhin werden die globalen Erwärmungspotenziale berechnet, um eine Gesamtbilanz aufzustellen.

Die Materialkosten der Varianten werden ermittelt, um eine CO₂-Bepreisung durchzuführen. Die Ergebnisse der Klimabilanz und der Wirtschaftlichkeitsberechnung werden im direkten Vergleich einander gegenübergestellt. Auch das Aufstockungsgewicht wird mithilfe der Massenermittlung untersucht sowie in den Vergleich einbezogen. Im Ergebnis sollen Aufstockungsvarianten zu erkennen sein, die in allen untersuchten Aspekten vorteilhaft sind. Dieser Vorgang wird in Abbildung 1 dargestellt.

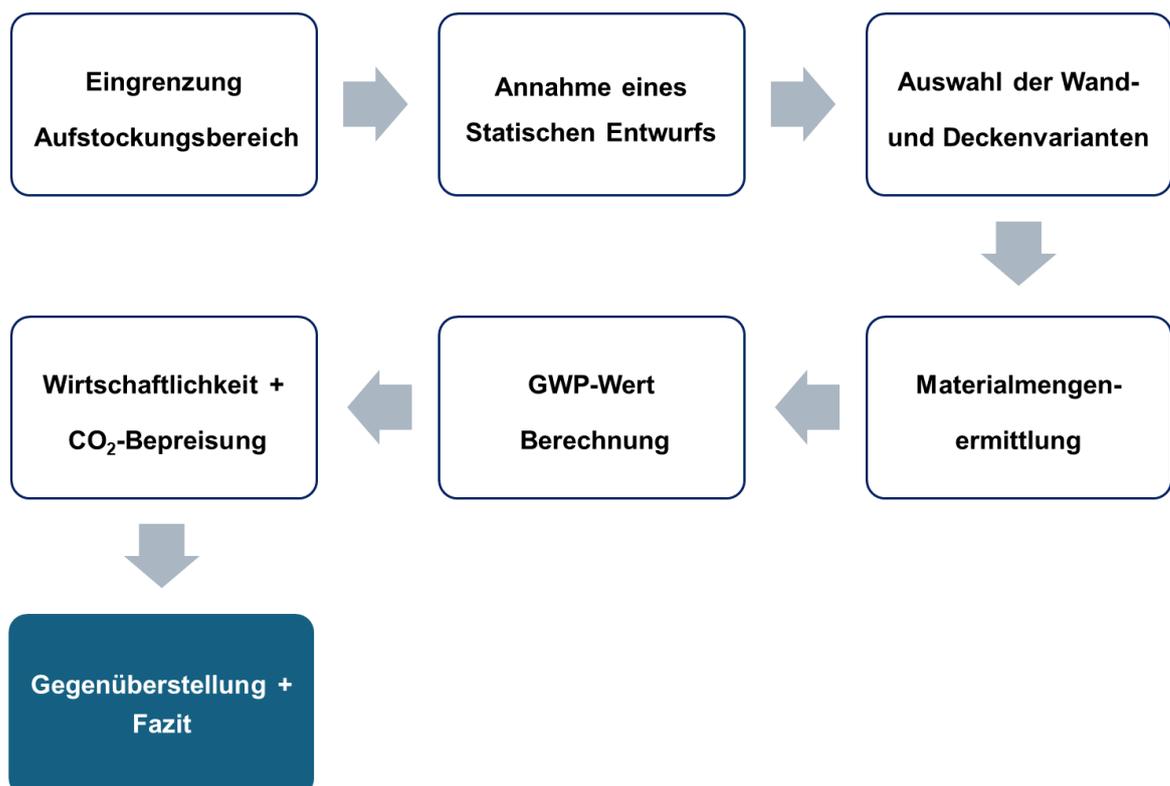


Abbildung 1 Vorgehensweise⁴

⁴ Eigene Darstellung.

2 Grundlagen

2.1 Allgemeines

2.1.1 Klimawandel

Der **Klimawandel** entspricht der Veränderung der durchschnittlichen globalen Lufttemperatur. Das **Klima** wird als das durchschnittliche Wetter definiert bzw. auch als statische Beschreibung von Mittelwerten aus Temperatur, Niederschlag und Wind. Das Klima verändert seinen Zustand im Vergleich zum ständig wechselnden Wetter nur langsam. Als **Wetter** wird ein stets wechselnder Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort beschrieben, wohingegen die **Witterung** dem Durchschnitt des Wetterablaufs an einem Ort über mehrere Tage bzw. Wochen entspricht.⁵ Den Grund für den Klimawandel bildet die erhöhte Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre. Die wesentlichen **Treibhausgase** sind Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und fluorierte Treibhausgase (F-Gase). Der Anteil der Treibhausgase an den Emissionen in Deutschland kann Abbildung 2 entnommen werden.⁶

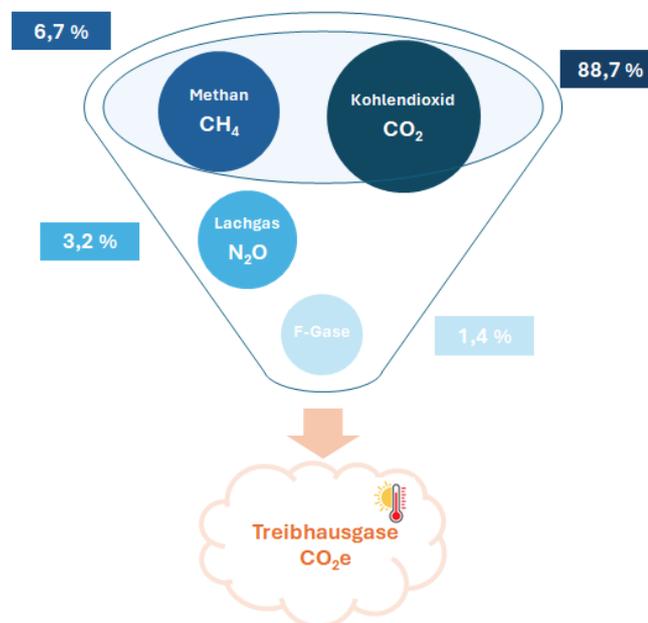


Abbildung 2 Anteile der Treibhausgase⁷

⁵ Vgl. Umweltbundesamt: Häufige Fragen zum Klimawandel, 15.03.2021, (URL 2) (28.11.2024, 13:18).

⁶ Vgl. Wilke, Sibylle: Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen, 17.05.2024, (URL 3) (29.11.2024,10:35).

⁷ Eigene Darstellung nach: Vgl. ebd.

Treibhausgase wirken sinnbildlich wie eine Isolierdecke, die um die Erde gewickelt ist und das Austreten der Wärme, die von der Sonne abgestrahlt wird, verhindert. Dieser Wirkungsmechanismus ist als natürlicher **Treibhauseffekt** bekannt.⁸ Nur auf seiner Grundlage ist die Erde für Menschen bewohnbar, denn ohne diesen Effekt würde die Sonneneinstrahlung auf der Erde ungehindert zurück in das Weltall entweichen: Die Funktion der Treibhausgase besteht darin, diese abgestrahlte Wärme in den Luftschichten der Erdatmosphäre zu behalten.

Seit der Industrialisierung emittieren Menschen neben anderen Treibhausgasen zunehmend auch CO₂. Die CO₂-Freisetzung entsteht bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern, der Verrottung der Wälder und den umweltschädlichen Aktivitäten der Menschen. Die beschriebenen Aktivitäten stärken den Treibhauseffekt und sorgen für den **Anstieg der globalen Erderwärmung**, die das Fortschreiten des Klimawandels und der mit diesem einhergehenden Dürren, Extremniederschläge und Hitzeextreme verursacht.⁹ Um zukünftige Generationen vor Naturkatastrophen und ähnlichen negativen Auswirkungen zu schützen, ist der Übergang zur Klimaneutralität essenziell. Dementsprechend sind im Bundesklimaschutzgesetz Emissionseinsparungsziele für die Sektoren Energie, Landwirtschaft, Verkehr, Industrie und Gebäude definiert.¹⁰ Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf den Gebäude- bzw. Bausektor.

2.1.2 Anteil des Gebäudesektors am Klimawandel

Zu Beginn dieser Arbeit wurde der Einfluss des Gebäudesektors bzw. Bausektor auf den globalen Treibhausgasausstoß erläutert. Hinsichtlich der Emissionsreduktion des Gebäudesektors liegt der Fokus aktuell noch auf den energiebedingten Emissionen und nicht ausreichend auf den konstruktionsbedingten Emissionen. Die energiebedingten Emissionen sind jene, die bei der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern entstehen. Die Emissionen für den eben beschriebenen Primärenergiebedarf bleiben in der vorliegenden Untersuchung

⁸ Vgl. Intergovernmental Panel on Climate Change: Klimawandel: Eine Zusammenfassung für alle, Genf, 2021, S. 6.

⁹ Vgl. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina: Klimawandel: Ursachen, Folgen und Handlungsmöglichkeiten, MyCoRe Community, o. O., 2021, S. 13.

¹⁰ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klima: Entwurf eines Klimaschutzprogramms, Berlin, 2023, S. 1.

unberücksichtigt. Die **konstruktionsbedingten Emissionen**, auch als graue Emissionen bezeichnet, fallen bei der Herstellung von Baustoffen, Bauteilen und Gebäuden sowie bei energetischen Sanierungen sowie Um- und Rückbauten an.¹¹ In der Verteilung der globalen CO₂-Emissionen entfallen **38 %** auf den Gebäudesektor. Hiervon werden **28 %** dem **direkten Gebäudebetrieb** und **10 %** der **Bauindustrie** zugeordnet, wobei es sich bei diesen 10 % um konstruktionsbedingte Emissionen handelt.¹² (vgl. Abbildung 3).

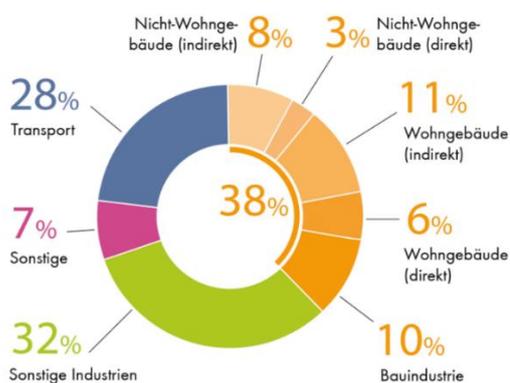


Abbildung 3 Verteilung der globalen CO₂-Emissionen¹³

Die Emissionen aus dem Transport von Baumaterialien werden dem Transportsektor zugerechnet, während im Gebäudesektor Emissionen aus Abbruch-, Rückbau- und Infrastrukturbauten unberücksichtigt bleiben. Der größte Anteil der **grauen Emissionen** eines Gebäudes entfällt auf das **Tragwerk**, das bei Massivbauten je nach Gebäudehülle 50 bis 70 % der grauen Emissionen ausmacht. Tragwerke sollten daher materialeffizient und umweltverträglich optimiert werden.¹⁴ Der Gebäudesektor in Deutschland hat im Jahr 2023 **102 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente emittiert**. Dies entspricht einer Reduktion um circa 7,5 % bzw. **8 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente** im Vergleich zum Vorjahr 2022. Der Gebäudesektor hat dennoch im Jahr 2023 die Jahresemissionshöchstmenge mit **1,2 Mio. CO₂-Äquivalenten** verfehlt. Der Gebäudesektor weist trotz der bis Herbst 2023 beschlossenen Maßnahmen eine Lücke von 32 Millionen Tonnen CO₂ auf, um die Emissionsziele von 67 Millionen Tonnen bis 2030 zu erreichen.¹⁵ Die Notwendigkeit

¹¹ Vgl. Weidner et al., 2021.

¹² Vgl. United Nations Environment Programme: 2020 Global Status Report for Buildings and Construction, Nairobi, 2020, S. 4.

¹³ Vgl. Weidner et al., 2021.

¹⁴ Vgl. ebd.

¹⁵ Vgl. Deutscher Bundestag: Klimaschutzbericht 2024, Berlin, 2024 (20. Wahlperiode), S. 36.

einer **Bauwende** und die damit verbundene Bedeutung der **CO₂-Bilanzierung von Bauwerken** werden im weiteren Verlauf thematisiert. Die dafür geeignete Vorgehensweise wird in Abschnitt 2.1.3 erläutert.

2.1.3 CO₂-Bilanzierung

Die CO₂-Bilanzierung gilt als Bewertungsmethode, mit der das Treibhausgaspotenzial einer Aktivität oder eines Produktes identifiziert wird.¹⁶ Es handelt sich um einen Teilaspekt der übergreifenden Ökobilanz, die nach **DIN EN ISO 14040** definiert wird und im Gegensatz zur CO₂-Bilanzierung eine ganzheitliche Betrachtung der Umweltauswirkungen eines Produktes oder eines Prozesses ergibt. Die Ökobilanz wird hierbei in **vier Phasen** untergliedert: Zunächst werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen der Ökobilanz festgelegt. Die Erstellung einer Sachbilanz bildet die Grundlage für die spätere Beurteilung und Auswertung der durchgeführten Ökobilanz.¹⁷ In dieser Arbeit wird die CO₂-Bilanzierung in Anlehnung an das Vorgehen bei einer Ökobilanz durchgeführt, weshalb das globale Erwärmungspotenzial verschiedener Aufstockungsvarianten im Mittelpunkt steht. In Abbildung 4 wird das Vorgehen beschrieben.

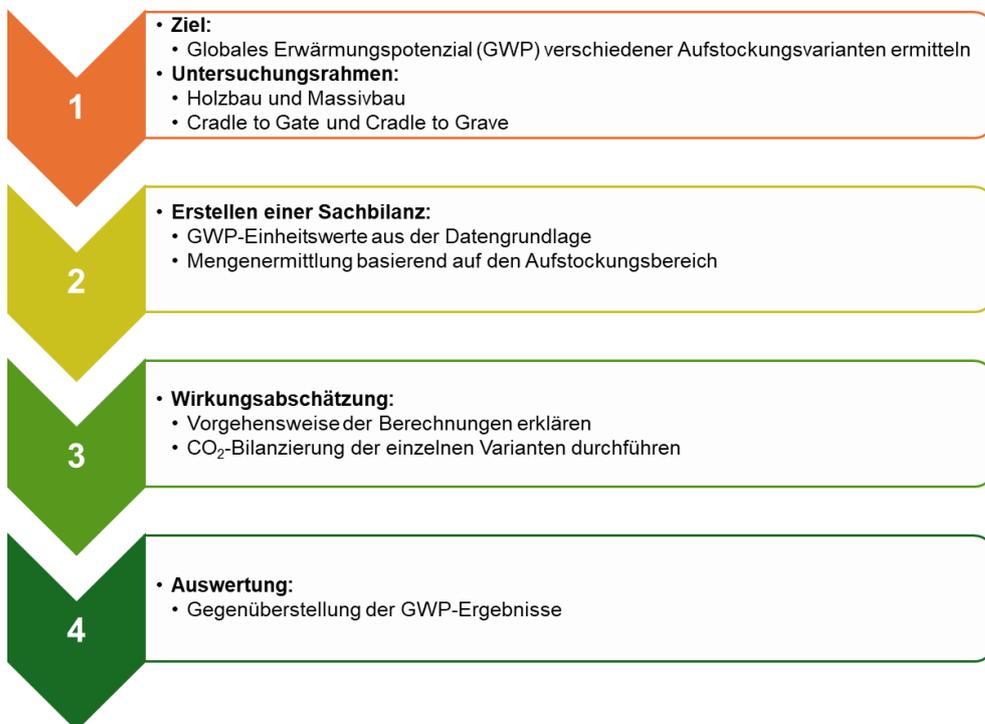


Abbildung 4 Vorgehensweise einer CO₂-Bilanzierung¹⁸

¹⁶ Vgl. Gebäudeforum: CO₂-Bilanzierung, 11.2022, (URL 4) (16.12.2024, 08:47).

¹⁷ Vgl. Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Berlin, 2021c.

¹⁸ Eigene Darstellung nach: Vgl. ebd.

2.1.4 Lebenszyklusphasen

Der Lebenszyklus eines Gebäudes wird nach unterschiedlichen DIN-Normen in Phasen des Lebensweges unterteilt. Das **Modul A** erstreckt sich von der Planungsphase (A0) über die Herstellungsphase (A1–A3) und bis zur Errichtungsphase (A4–A5). Das **Modul B** (B1–B5) entspricht der Nutzungsphase bzw. dem Gebäudebetrieb. Des Weiteren beinhaltet das **Modul C** die Entsorgungsphase (C1–C4). Das **Modul D** gilt als eine Erweiterung des Lebenszyklus und umfasst die Wiederverwendung bzw. das Recyclingpotenzial (vgl. Abbildung 5).¹⁹

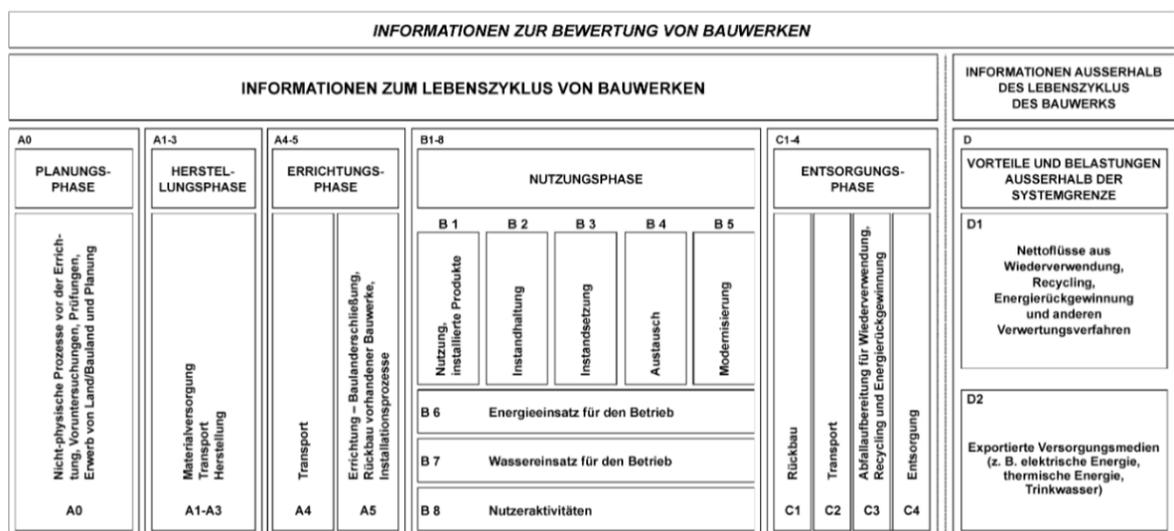


Abbildung 5 Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15643²⁰

Aufgrund des vorliegenden Untersuchungsrahmens wird das Bilanzierungsszenario der Lebenszyklusphasen in dieser Arbeit auf die **Herstellungsphase (A1–A3)** und die Entsorgungsphase bzw. **Abfallbehandlung (C3)** beschränkt. Die Nutzungsphase (B) wird, ebenso wie das Modul D mit der Wiederverwendung und dem Recyclingpotenzial nicht berücksichtigt, da diese für das Vorhaben keine Relevanz spielen.

¹⁹ Vgl. Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 15643: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertungsmethodik – Rahmenbedingungen, Berlin, 2021b, S. 31.

²⁰ Vgl. Deutsches Institut für Normung e. V., 2021b.

2.1.5 Cradle to Gate, Grave, und Cradle

Das betrachtete Bilanzierungsszenario A1–A3 wird in der Kreislaufwirtschaft als ‚**Cradle to Gate**‘ (von der Wiege bis zum Werkstor) bezeichnet. Über dieses Szenario hinausgehend steht der Begriff ‚**Cradle to Grave**‘ (von der Wiege bis zur Bahre) für die Lebenszyklusphasen A1–A3 + C3. Rohstoffe, die nach ihrer Lebensdauer wiederverwendet werden, treten wieder in den Kreislauf ein. Dieser Prozess wird mit dem Begriff ‚**Cradle to Cradle**‘ (von der Wiege bis zur Wiege) zusammengefasst und beinhaltet alle Lebenszyklusphasen (vgl. Abbildung 6).²¹

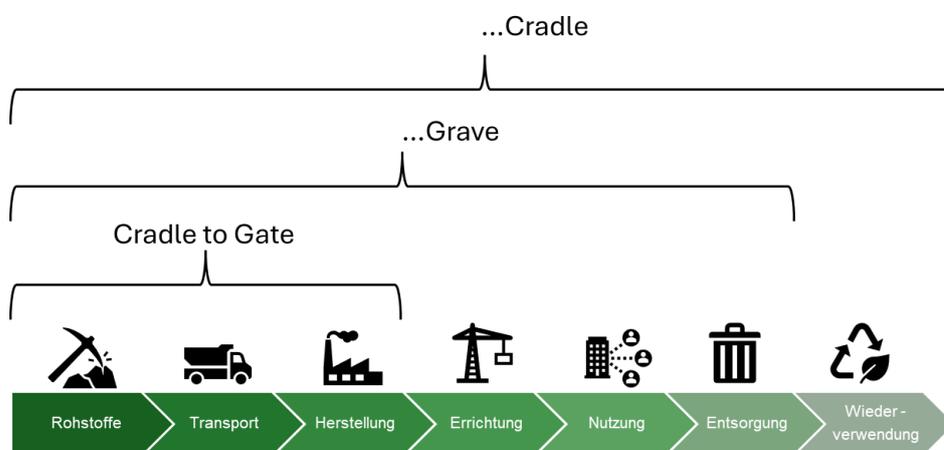


Abbildung 6 Cradle to Gate, Cradle to Grave, und Cradle to Cradle²²

2.2 Bauen in der Zukunft

2.2.1 Vertikale Nachverdichtung

Um ein mit der Natur und der Atmosphäre kompatibles Bauschaffen erreichen zu können, müssen dem Neubau immer der Erhalt und der Umbau des Gebäudebestandes vorgezogen werden, um an (begrenzt verfügbarer) Fläche zu sparen. Durch energetische Sanierungen, Revitalisierungen, aber auch **vertikale Nachverdichtungsmaßnahmen** (Aufstockungen) kann dem Gebäudebestand in Deutschland nachhaltig eine erhöhte Lebensdauer ermöglicht werden.

Die Aufstockung hat zum Vorteil, dass moderne Arbeitsplätze, aber vor allem auch mehr Wohnraum geschaffen werden können. Dadurch kann die Versiegelung von Grünfläche vermieden werden, die zur CO₂-Aufnahme aus der Atmosphäre beiträgt.

²¹ Vgl. Kürschner, Kai: Klimateffiziente Holzkonstruktionen im Geschossbau, Kapitel 2, Stuttgart, 2024b, S. 29.

²² Eigene Darstellung nach: Kürschner, 2024d.

In Ballungszentren sind Gebäudeaufstockungen besonders relevant, da diese mit dem zunehmenden Bevölkerungswachstum ohnehin schon Flächenknappheit aufweisen.

Die **Bauindustrie** kann die aktuelle Nachfrage hinsichtlich bezahlbarer Wohnräume aufgrund steigender Grundstückpreise, der Dauer von Baugenehmigungen, erhöhter Baukosten und der **geringen Bauflächenverfügbarkeit** kaum decken. Gleichzeitig intensiviert das hohe Bevölkerungswachstum die Nachfrage so stark, dass nicht genug Bauwerke errichtet werden können:²³ Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, jährlich **400.000 bedarfsgerechte und klimafreundliche Wohnungen** zu bauen.²⁴ Das Statistische Bundesamt berichtet allerdings, dass im Jahr **2023 circa 294.400 Wohn- und Nichtwohngebäude** fertiggestellt wurden. Angesichts dieser Unterschreitung des Ziels besteht künftig großer Handlungsbedarf²⁵ (vgl. Abbildung 7).

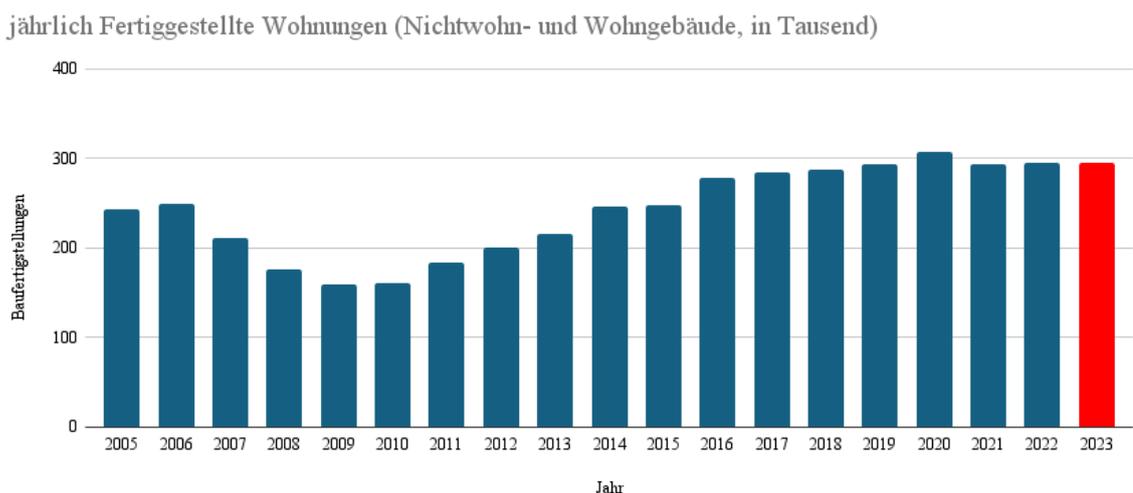


Abbildung 7 Jährliche Baufertigstellungen²⁶

Der aktuelle Bedarf, der bei circa 800.000 Wohnungen liegt, kann durch eine vertikale Nachverdichtung zu circa **20 bis 50 %** gedeckt werden. Durch die fortschreitende Digitalisierung und die daraus resultierende Arbeitsplatzverlagerung in das ‚Home-Office‘ nimmt die Nutzung von Büroflächen weiter ab. Hieraus ergibt

²³ Vgl. PricewaterhouseCoopers: Vertikale Verdichtung: Lebensraum Stadt nachhaltig und zukunftsfähig gestalten, 08.2023, (URL 5) (02.12.2024, 18:47).

²⁴ Vgl. Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen: Auftakt "Bündnis bezahlbarer Wohnraum", 27.04.2022, (URL 6) (04.12.2024, 11:07).

²⁵ Vgl. Statistisches Bundesamt: 0,3 % weniger fertiggestellte Wohnungen im Jahr 2023, 23.05.2024.-c, (URL 7) (04.12.2024, 11:41).

²⁶ Eigene Darstellung nach: Vgl. ebd.

sich die Chance für Aufstockungen. Für eine Umnutzung und eine Aufstockung kommen mehr als schätzungsweise **149.000 Büro- und 152.000 Verwaltungsgebäude** in Frage. Durchschnittlich können Bestandsgebäude um circa **1,3 Geschosse** erhöht werden. Einer Studie aus dem Jahr **2023** zufolge könnten allein durch die Aufstockung von Verwaltungsgebäuden zusätzliche circa **375.000 Wohneinheiten** entstehen.²⁷ Das größte CO₂-Einsparungspotenzial einer Aufstockung liegt in der Bauweise und der Auswahl der **Tragwerksmaterialien**, die möglichst aus materialeffizienten und klimaneutralen Rohstoffen bestehen sollen. Ein nachhaltiger Ansatz besteht darin, den Baustoff Holz zu nutzen, weshalb dieser in Kapitel 5 für die fiktive Aufstockung eines Büro- und Verwaltungsgebäudes eingesetzt und hinsichtlich seiner Klimawirksamkeit bewertet wird.

2.2.2 Nachhaltigkeit

Der Begriff ‚Nachhaltigkeit‘ basiert nach Auffassung der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen auf dem integrativen Dreisäulenmodell der **Ökologie**, der **Ökonomie** und des **Sozialen**. Jeder der enthaltenen Säulen ist von gleicher Relevanz. Der ökonomische Aspekt erhält nach dem aktuellen Trend allerdings zunehmend eine untergeordnete Rolle, wohingegen die sozialen Bereiche und insbesondere der ökologische Aspekt wichtiger werden²⁸ (vgl. Abbildung 8).



Abbildung 8 Dreisäulenmodell der Nachhaltigkeit²⁹

²⁷ Vgl. PricewaterhouseCoopers: Vertikale Verdichtung: Lebensraum Stadt nachhaltig und zukunftsfähig gestalten, 08.2023., (URL 8) (02.12.2024, 18:47).

²⁸ Vgl. DGNB: Nachhaltigkeitsansatz der DGNB, o. J., (URL 9) (04.12.2024, 17:38).

²⁹ Eigene Darstellung nach: Vgl. ebd

Der **ökonomische Aspekt** bezieht sich auf die wirtschaftlich sinnvolle Nutzung eines Gebäudes über alle Lebenszyklusphasen, während der Fokus des **sozialen Aspekts** dem Wohlbefinden der Menschen in der gebauten Umwelt gilt. Übertragen auf die Bauindustrie erfordert der **Aspekt der Ökologie** kurzgefasst den sparsamen Umgang mit vorhandenen Ressourcen und ein klimafreundliches Bauen.³⁰ Die CO₂-Bilanzierung dient lediglich als ein Werkzeug zur Bewertung der Klimawirksamkeit eines Bauwerks und kann keine ganzeinheitliche Aussage über die Nachhaltigkeit von Bauwerken ergeben, da nur ein Teilaspekt der drei Nachhaltigkeitskriterien berücksichtigt wird. Die **Baubranche** gilt als der größte Umweltverschmutzer weltweit und verantwortet circa die Hälfte aller globalen CO₂-Emissionen, des Energie- und Ressourcenverbrauchs sowie des Abfallaufkommens.³¹ Es liegt daher in der Zukunftsverantwortung des Bauwesens, nachhaltiger zu bauen, was unter anderem ressourcenarmes Bauen durch Leichtbau bzw. recyclinggerechtes Bauen und das Bauen mit Sekundärrohstoffen erfordert.³² Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird darauf eingegangen, wie der Baustoff **Holz** diese und weitere Eigenschaften vereint.

Das Gesundheits- und Umweltbewusstsein der Gesellschaft nimmt immer mehr zu. Im Zuge dessen gewinnen emissionsarme, recycelbare und **nachwachsende Baustoffe** gegenüber mineralischen Materialien an Bedeutung. Insbesondere der Baustoff Holz rückt durch seine Vielseitigkeit und Umweltverträglichkeit in den Fokus der Bauschaffenden.³³

Seit der Industrialisierung kommen überwiegend Baustoffe mineralischer Basis für die Herstellung von Gebäuden zum Einsatz. Die Substituierung mineralischer Baustoffe durch Holz muss heute ausgedehnt werden und effizient erfolgen, denn auch mit der Ressource Holz muss sorgsam umgegangen werden, da die verfügbare Menge an Bauholz nicht dem Bedarf nachkommen kann. Um dieser Knappheit für zukünftige Generationen entgegenzuwirken, muss die Aufforstung schnell wachsender Bäume zunehmen. Im Sinne der Nachhaltigkeit muss demnach für jeden gefällten Baum ein neuer Setzling gepflanzt werden.³⁴ Dies gilt, denn der

³⁰ Vgl. DGNB: Nachhaltigkeitsansatz der DGNB, o. J., (URL 10) (04.12.2024, 17:38).

³¹ Vgl. Kürschner, 2024c, S. 9.

³² Vgl. Sobek, Werner: 17 Thesen zur Nachhaltigkeit, o. J., (URL 11) (04.12.2024, 22:44).

³³ Vgl. Sobek, Werner: Non nobis - Über das Bauen in der Zukunft; Band 1: Ausgehen muss man von dem, was ist, 5. Aufl., Stuttgart, 2022, S. 66.

³⁴ Vgl. ebd.

menschengemachte Klimawandel kann nur bekämpft werden, wenn die bisher gebaute Umwelt von einer CO₂-Quelle zu einer **CO₂-Senke** transformiert wird.³⁵ Durch die Fähigkeit von Holz, CO₂ zu binden, kann diese **Transformation** bewerkstelligt werden, wie in Abschnitt 2.2.3 dargelegt wird.

2.2.3 Potenziale einer Aufstockung mit Holz

Im vorherigen Abschnitt wurde angesichts des fortschreitenden Klimawandels, der Flächenknappheit und der Wohnungsnot die Notwendigkeit einer ökologischen Bauweise erläutert. Der verfügbare Gebäudebestand in Deutschland kann summierend durch Umnutzungen sowie Nachverdichtungsmaßnahmen ökologisch sinnvoll genutzt werden. Durch den Erhalt von Bestandsgebäuden können graue Emissionen, die bereits in der Konstruktion gebunden sind, bewahrt werden.³⁶

Im Vorfeld einer **Gebäudeaufstockung** ist im Rahmen der Grundlagenermittlung eine Tragwerksanalyse erforderlich, um unter anderem vorhandene Lastreserven zu identifizieren.³⁷ Im Fall einer Aufstockung eignet sich Holz dank des **geringen Eigengewichts** im Vergleich zu mineralischen Baustoffen besser dafür, Lastreserven optimal auszunutzen und mehrgeschossige Bauten herzustellen. Verkürzte Bauzeiten und geringe Lärm- bzw. Staubemissionen resultieren aus dem **hohen Vorfertigungsgrad** und der einfachen Montage von Holzbauerelementen.³⁸ Ferner beträgt die Konstruktionsfläche einer Holztafelwand circa drei Viertel von der einer Stahlbetonwand, was zur maximalen Ausnutzung des verfügbaren Bauraumes beiträgt. Auch Dämmsichten können dank der geringen Wärmeleitfähigkeiten von Holz in die Tragkonstruktion integriert werden. In der Regel können Neubauten allerdings nicht als reiner Holzbau ausgeführt werden, da für die Gründung des Fundaments, der Untergeschosse und der Treppenhäuser Bauteile aus Stahlbeton unerlässlich sind. Dies kann sich negativ auf die Gesamtemissionsbilanz bei Holzneubauten auswirken. Bei der Ergänzung eines Bestandsgebäudes durch eine Aufstockung bleibt die Herstellung der eben erwähnten Stahlbetonbauteile meistens aus, womit das ökologische Potenzial von

³⁵ Vgl. Kürschner, 2024b.

³⁶ Vgl. Krötsch, Stefan; Stieglmeier, Manfred; Engel, Thomas: Holzbau im Bestand, Detail Business Information, München, 2024, S. 11.

³⁷ Vgl. Maren, Fath et al.: Zukunft Bau Leitlinie Aufstockung, Fraunhofer IRB, o. O., 2019, S. 23.

³⁸ Vgl. Krötsch, Stieglmeier, Engel, 2024, S. 11.

Holz maximal genutzt werden kann. Zu den wenigen Nachteilen von Holz zählen **formaldehydhaltige** Klebstoffe in Holzbauelementen, die für den Menschen gesundheitsschädlich sein können, eine **geringe Schalldämmung**, das Materialverhalten wie **Kriechen** und **Schwinden**, die **Witterungsanfälligkeit**, der mögliche **Schädlingsbefall** sowie die **Brennbarkeit** und die mit dieser verbundenen **baurechtlichen Hürden**.³⁹ In Summa bietet eine Holzaufstockung sowohl Vorteile als auch Nachteile, wobei hier deutlich die Vorteile überwiegen. Durch den Einsatz von Holz kann im Sinne der heutigen Umbaukultur insbesondere in urbanen Gebieten eine Nachverdichtung durch vertikale Aufstockungen in einer klima- und ressourceneffizienten Bauweise stattfinden.

2.2.4 Holzbauweisen im Überblick

Abbildung 9 dient als Übersicht der heutzutage praxisüblichen Holzbauweisen, die hier zur Vereinfachung in die Kategorien **„Massivbau“** und **„Leichtbau“** unterteilt werden. In Kapitel 5 werden die CO₂-Emissionen ausgewählter Holzwand- und Deckenelemente im Vergleich zu konventionellen Bauweisen bilanziert sowie bewertet (vgl. Abbildung 9).

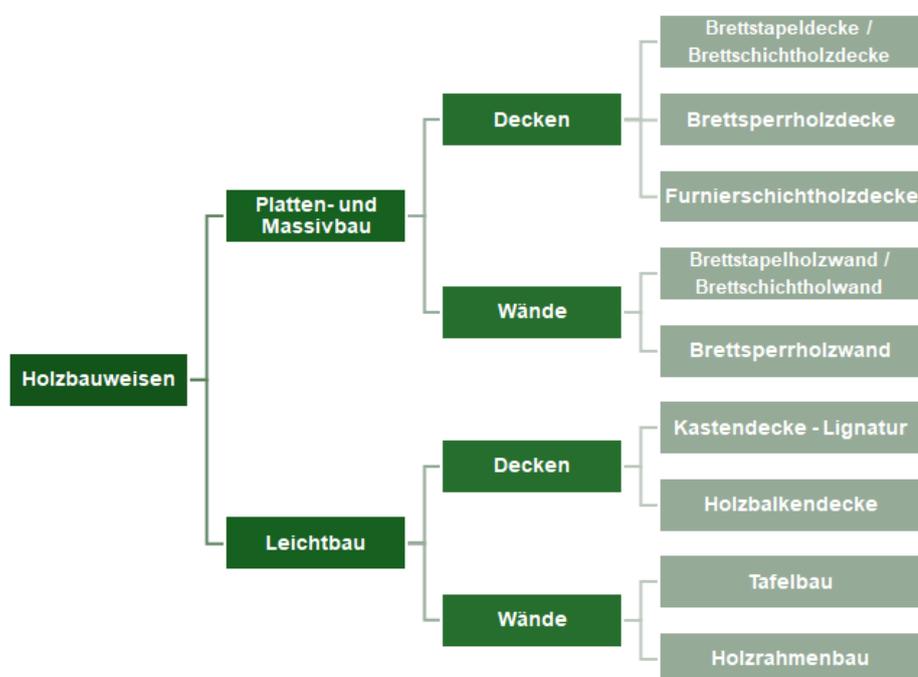


Abbildung 9 Holzbauweise und Holzbauelemente⁴⁰

³⁹ Vgl. ebd.

⁴⁰ Eigene Darstellung nach: Vgl. Kaufmann, Hermann; Krötsch, Stefan; Winter, Stefan: Atlas mehrgeschossiger Holzbau: Grundlagen - Konstruktionen - Beispiele, 5. Aufl., Detail Business Information, München, 2024.

3 Fallbeispiel

3.1 Projektvorstellung

Vor dem Hintergrund einer CO₂-Bilanzierung und einer Wirtschaftlichkeitsberechnung verschiedener Aufstockungsvarianten wurde als **Berechnungsgrundlage** das Büro- und Verwaltungsgebäude der Deckerstraße 41 in Stuttgart-Bad Cannstatt verwendet. Gebaut wurde das Gebäude im Jahr 1997 und es befindet sich derzeit in einer Objektrevitalisierung, die nach Vollendung von der Cybersicherheitsagentur Baden-Württemberg bezogen wird. Mit einer Grundstücksgröße von circa 2.247 m² und einer Gesamtfläche von 5.101 m² erstreckt sich das Gebäude in der Skelettbauweise über sechs oberirdische Geschosse, wobei es in zwei Bauteilhälften aufgeteilt ist. Der Standort befindet sich wegen der hohen Dichte gleichzeitig an benachbarten Wohngebäuden, Einkaufszentren, Bahntrassen und Büro- sowie Geschäftshäusern in einer urbanen Region. Für die Aufwertung und die nachhaltige Nachverdichtung des Standorts wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit das Potenzial einer fiktiven Aufstockung in der Holzbauweise analysiert sowie in Vergleich zu herkömmlichen Aufstockungsvarianten gesetzt (vgl. Abbildung 10).

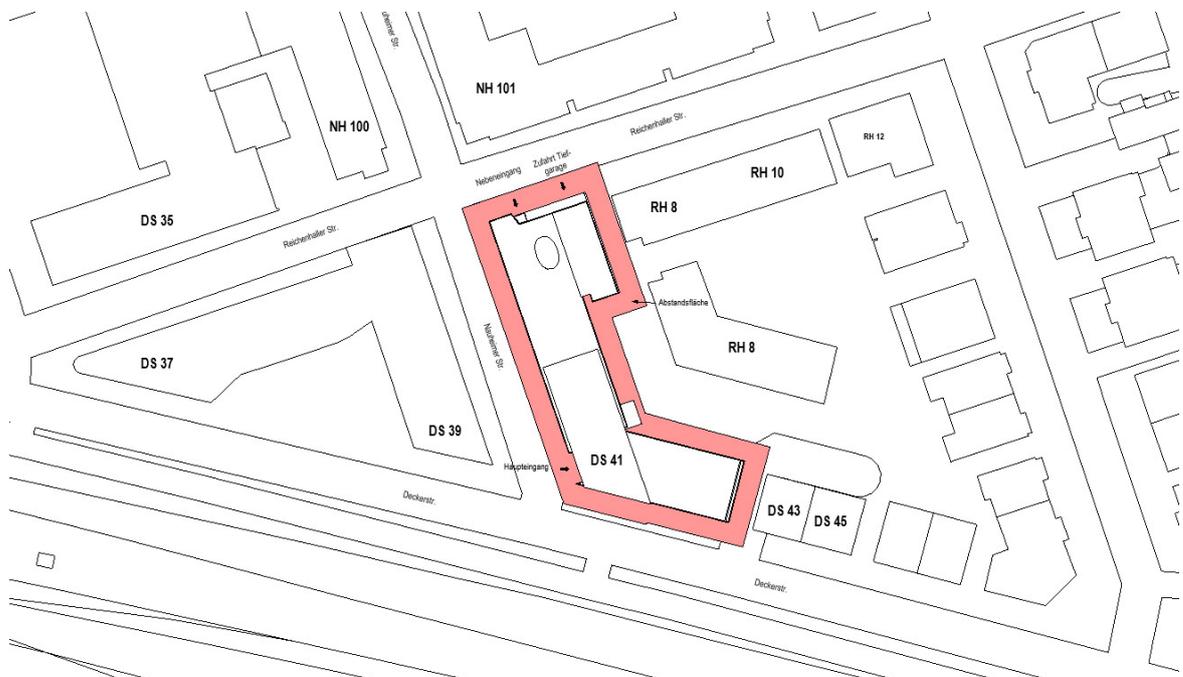


Abbildung 10 Lageplan des Bestandsgebäudes⁴¹

⁴¹ Eigene Darstellung.

3.2 Vereinfachte Randbedingungen

Die **fiktive Aufstockung**, die in der vorliegenden Arbeit behandelt wird, wird auf einem **eingegrenzten Bereich** der Dachfläche auf dem fünften Obergeschoss bzw. über dem vierten Obergeschoss in verschiedenen Varianten ausgeführt. In dieser Arbeit wird die **Belastbarkeit** der darunterliegenden tragwerksrelevanten Bauteile durch die Eingrenzung des Aufstockungsbereichs als **ausreichend** angenommen. Bei der Eingrenzung des Grundrisses wurde darauf geachtet, dass sich darunterliegend tragende Bauteile befinden müssen. In den nachfolgenden Abbildungen wird der Aufstockungsbereich skizzenhaft visualisiert (vgl. Abbildung 11–13).

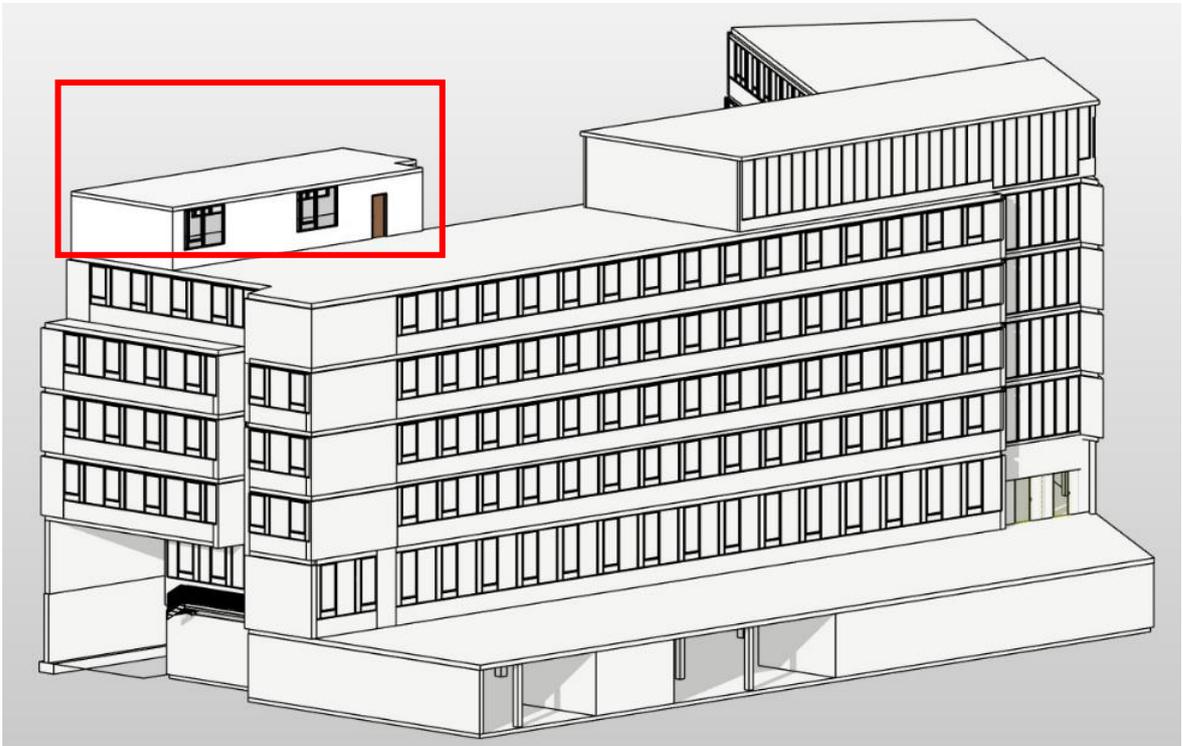


Abbildung 11 Visualisierung des Aufstockungsbereichs⁴²

Die Bauteilabmessungen sind Abbildung 12 zu entnehmen, in der nur der eingegrenzte Bereich des tatsächlichen Grundrisses enthalten ist. Für die Ermittlung der Wandfläche wurde einheitlich bei allen Varianten eine Wandhöhe von **2,90 m** gewählt, die mit circa **51 m** multipliziert wurde. Dies ergibt circa **147,9 m²** an Wandfläche, von der noch Tür- und Fensterflächen abgezogen werden müssen. Gemäß den Vorgaben aus der **DIN 5034-1** (Tageslicht in Innenräumen) beträgt die

⁴² Eigene Darstellung.

Fensterfläche eines Gebäudes ein Achtel der Nettogrundfläche.⁴³ Im Rahmen dieser Arbeit wird die abziehende Fensterfläche auf circa **20 %** der Grundfläche festgelegt, da die Angaben aus der **DIN 5034-1** als Mindestanforderung zu verstehen sind. Die Grundfläche erreicht demnach circa **117,20 m²** und daraus resultierend ergeben sich circa **23,44 m²**, die zuzüglich der Fläche für eine Tür mit **2,16 m²** von der ermittelten Wandfläche abzuziehen sind. Im Ergebnis wird für die nachfolgenden Berechnungen eine Wandfläche von **122,30 m²** angenommen. Die **Deckenfläche** und gleichzeitig auch die **Bruttogrundfläche** betragen circa **127,32 m²**. Da in dieser Arbeit Deckenvarianten unterschiedlicher Bauteildicke verwendet werden, variiert die tatsächliche Geschosshöhe zwischen **3,10 m** und **3,18 m**. In Anhang 1 befindet sich ein Ausschnitt des tatsächlichen Grundrisses.

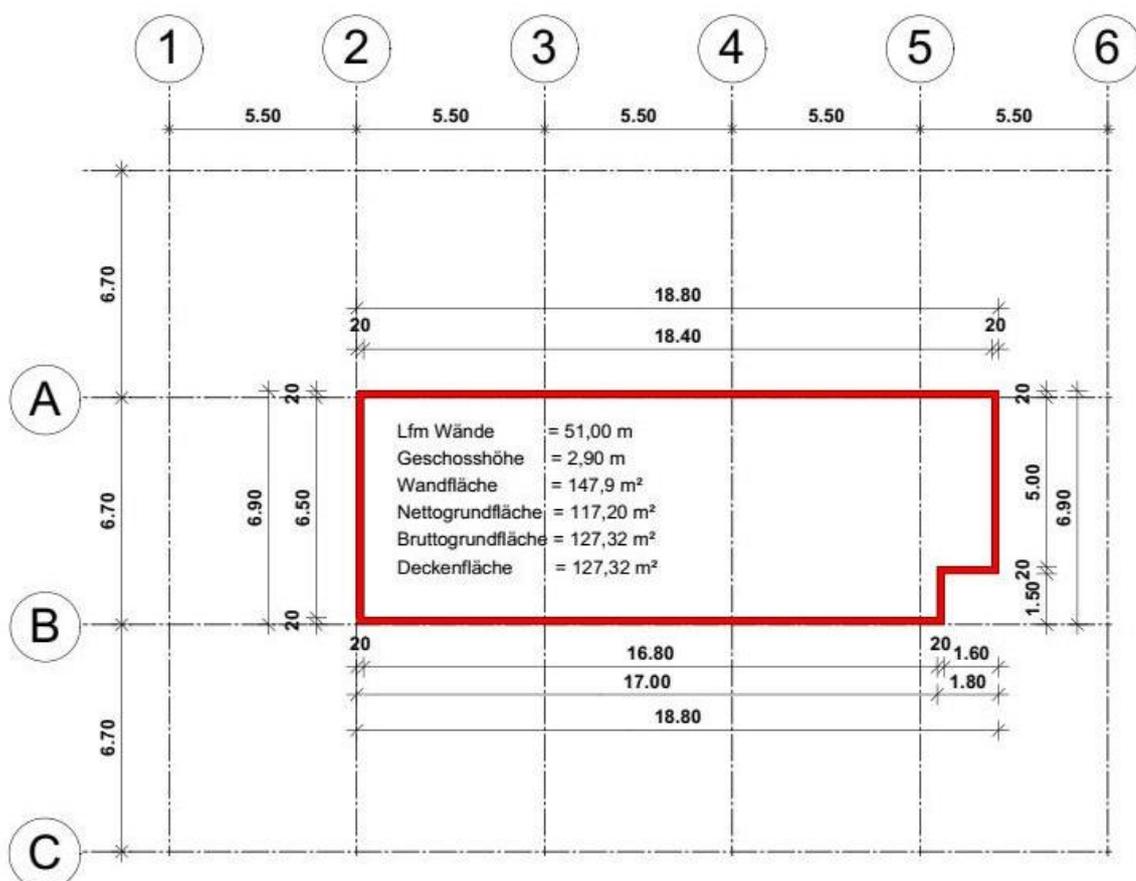


Abbildung 12 CAD-Skizze Grundriss Aufstockungsbereich⁴⁴

⁴³ Vgl. Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 5034-1: Tageslicht in Innenräumen - Teil 1: Begriffe und Mindestanforderungen, Berlin, 2021a, S. 12.

⁴⁴ Eigene Darstellung.

4 Aufstockungsvarianten

4.1 Statischer Entwurf

Zur Festlegung der Bauteildicken wurden in dieser Forschungsarbeit **statische Annahmen** basierend auf Schlankheitswerten getroffen. Die **Schlankheitswerte** beruhen auf Erfahrungswerten praktizierender Tragwerksplaner. Die ausgewählten **Decken** sind mit einer **Spannweite** von etwa **7,00 m** einachsig gespannt und auf den Wänden aufgelagert. Für die **Außenwände** wurde zur Vereinfachung der nachfolgenden Berechnungen eine einheitliche Bauteildicke von **20 cm** angenommen (vgl. Tabelle 2).

Variante	Spannweite L [m]	Schlankheit	Deckenhöhe
Brettsperrholzdecke	6,90 ≈ 7,00	L/29 – L/23	240
Brettschichtholzdecke	6,90 ≈ 7,00	L/35 – L/30	200
Holzbetonverbunddecke	6,90 ≈ 7,00	L/28 – L/22	230
Kastendecke–Lignatur	6,90 ≈ 7,00	L/30 – L/26	250
Stahlbeton-Flachdecke	6,90 ≈ 7,00	L/35	280
Spannbeton–Fertigteildecke	6,90 ≈ 7,00	L/25	200

Tabelle 2 Annahme eines statischen Entwurfs⁴⁷

4.2 Varianten im Holzbau

4.2.1 Holztafelbauwand

Die Holztafelwand ist eine **weiterentwickelte Ständerbauweise** aus dem Fachwerkbau. Der Aufbau der ausgewählten Holztafelwände besteht aus **16 cm tiefen Holzständern**, die im Achsabstand von 62,5 cm platziert werden, einer horizontalen Kopf- und Fußschwelle sowie einer beidseitigen Beplankung aus **OSB-Platten** mit jeweils **20 mm Dicke**. Die Beplankung sorgt für die Steifigkeit und die Lastabtragung der Holzständer. Die Holzständer können aus Brettschichtholz oder Konstruktionsvollholz bestehen, wobei in dieser Betrachtung Konstruktionsvollholz verwendet wird. Gewählt wurde die Holztafelwand aufgrund der ressourcenarmen und einfachen Bauweise.

⁴⁷ Vgl. Kürschner, 2024a.

Aufgrund des hohen Vorfertigungsgrades und der aus diesem resultierenden kurzen Bauzeiten eignen sich Holztafelwände besonders für eine vertikale Aufstockung in urbanen Zentren.⁴⁸ Ihre Klimaverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit werden in den nachfolgenden Kapiteln 5 und 6 analysiert.

4.2.2 Brettschichtholz wand

Für eine Brettschichtholz wand werden ähnlich einer Brettstapelholz wand einzelne Nadelholzbretter vertikal nebeneinander gereiht und miteinander verleimt. Bei einer Brettstapelholz wand erfolgt die Verbindung mechanisch über Befestigungsmittel wie Hartholzdübel. Brettschichtholz wände eignen sich dank ihrer Verleimung als **hochtragfähige Bauteile** und daher auch für Wandkonstruktionen im Hochbau. Durch die Verleimung werden zudem die nachteiligen Eigenschaften von Holz wie Kriechen und Schwinden reduziert. Brettschichtholz kann wie Brettsperrholz aufgrund der hohen Materialdichte große Mengen an Kohlenstoff binden.⁴⁹

4.2.3 Brettsperrholz wand

Eine Brettsperrholz wand besteht aus kreuzweise angeordneten Brettschichtlagen, die miteinander verleimt sind. In der Regel sind die einzelnen Lamellen 40–60 mm stark. Dadurch kann eine **Bauteildicke von 6 bis 28 cm** bei drei bis sieben Brettlagen entfallen. Brettsperrholz wände sind bis zu einer **Höhe von 4 m** ausführbar. Aufgrund der hohen Masse eignen sie sich als massive und tragfähige Bauteile für mehrgeschossige Gebäude. Dank ihrer Vorfertigung und Flexibilität können Brettsperrholz wände auf Baustellen in kurzer Zeit montiert werden. Ein besonderer Vorteil liegt bei Brettsperrholzelementen darin, dass hohe Mengen an Kohlenstoff gebunden werden können. Dieses Potenzial wird in Kapitel 5 untersucht.⁵⁰

⁴⁸ Vgl. Kaufmann, Krötsch, Winter, 2024, S. 28–30.

⁴⁹ Vgl. Binderholz: Brettschichtholz BSH Deckenelemente, 11.04.2022, (URL 12) (16.12.2024, 16:35).

⁵⁰ Vgl. Kaufmann, Krötsch, Winter, 2024.

4.2.4 Brettsperrholzdecke

Für die Brettsperrholzdecke gilt eine ähnliche Zusammensetzung wie bei einer Brettsperrholzwand. Der kreuzweisen Verleimung der Brettlagen geschuldet besitzt die Brettsperrholzdecke eine hohe Tragfähigkeit in beiden Richtungen. Die aus Laubholz bestehenden und verstärkten Deckenlamellen einer Brettsperrholzdecke sorgen für eine höhere Abbrand-Rate und erfüllen daher die Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten. Die Brettsperrholzdecke kann für **Bauteilhöhen von 12 bis 28 cm** ausgeführt werden, was fünf bis sieben Brettlagen entspricht. Die Deckenelemente sind bis zu **6 m breit, bis zu 16 m lang** und haben eine **Stützweite von bis zu 7 m**.⁵¹ Die Montage vor Ort erfolgt aufgrund der Vorfertigung ebenso einfach, womit sie kürzere Bauzeiten ermöglicht.⁵²

4.2.5 Brettschichtholzdecke

Brettschichtholz-Deckenelemente bestehen aus Fichte-Brettschichtholz und werden aus horizontal angeordneten, faserparallel verleimten Brettlagen zusammengesetzt. Diese Bauweise verleiht Deckenelementen eine **hohe Tragfähigkeit** bei gleichzeitig **geringer Deckenstärke** und **niedrigem Eigengewicht**. Aufgrund des hohen Vorfertigungsgrades der Elemente sind schnelle Montagen auf der Baustelle umsetzbar. Dies sorgt wiederum für verkürzte Bauzeiten.⁵³ Mit einer möglichen **Stützweite von bis zu 7 m** und **Längen von bis zu 27 m** bieten Brettschichtholzdecken flexible Einsatzmöglichkeiten.⁵⁴ Brettschichtholzdecken haben ebenso die Eigenschaft, Kohlenstoff in sich zu binden und damit die Umwelt zu entlasten. Dieses Potenzial wird in Kapitel 5 mittels einer CO₂-Bilanzierung untersucht.

⁵¹ Vgl. Kürschner, 2024a.

⁵² Vgl. Kaufmann, Krötsch, Winter, 2024.

⁵³ Vgl. Binderholz: Brettschichtholz BSH Deckenelemente, 11.04.2022, (URL 13) (16.12.2024, 16:35).

⁵⁴ Vgl. ebd.

4.2.6 Lignatur-Kastendecke

Die Lignatur-Kastendecke, die auch ‚**Hohlkastenelement**‘ genannt wird, ist eine Weiterentwicklung der Holzbalkendecke. Sie besteht aus vertikalen Rippen (mit einem Abstand von 40–70 cm), horizontalen Randbalken aus Brettschichtholz oder Konstruktionsvollholz sowie beidseitiger Bepankung aus Dreischichtplatten, Furnierschichtholz oder OSB-Platten. Alle Bestandteile sind schraubpressverleimt. Die Hohlräume können effizient für die Dämmung genutzt werden. Mit hoher Tragfähigkeit, **Stützweiten bis 10 m und Deckenhöhen von 12–48 cm** zeichnet sich die Konstruktion durch Materialersparnis und eine einfache Montage mit kurzen Bauzeiten aus.⁵⁵ Die ökologischen und ökonomischen Potenziale einer Lignatur-Kastendecke werden in den Kapiteln 5 und 6 untersucht.

4.2.7 Holzbetonverbunddecke

Die Holz-Beton-Verbunddecke ist ein Synergieprodukt aus Holz und Beton, das zu etwa **zwei Dritteln** aus **Holz** und zu **einem Drittel** aus **Aufbeton** besteht. Der Holzgurt ist meist aus **Brettstapelholz**, Holzbalken oder Brettsperrholzdecken zusammengesetzt, auf die eine **6–12 cm dicke Betonschicht** aufgetragen wird. Für diese Konstruktion werden die bauphysikalischen und statischen Vorteile beider Materialien kombiniert: Der Betonanteil nimmt **Druckkräfte** auf, während der Holzanteil **Zugkräfte** trägt. Die Decke ermöglicht Stützweiten von bis zu 9 m. Die Aufbetonschicht kann entweder vor Ort vergossen oder in der Vorproduktion als Fertigteil hergestellt und auf der Baustelle montiert werden. In dieser Arbeit wird eine Holzbetonverbunddecke mit einer Gesamtdeckenstärke von 23 cm gewählt – bestehend aus einer 15 cm starken Brettstapelholzdecke und einer 8 cm starken auftragenden Betonschicht.⁵⁶

⁵⁵ Vgl. Ag, Lignatur: LIGNATUR - das tragende Element für Dächer und Decken, o. J., (URL 14) (16.12.2024, 16:39).

⁵⁶ Vgl. Kaufmann, Krötsch, Winter, 2024.

4.3 Varianten im Massivbau

4.3.1 Stahlbeton mit Normalbeton

In dieser Betrachtung werden die Potenziale einer Holzaufstockung mit denen konventioneller Bauweisen verglichen. Stahlbetonwände und -decken bestehen aus den Komponenten **Beton** und **Bewehrungsstahl**. Bislang finden noch überwiegend diese Decken bei Bauvorhaben Anwendung. Beton nimmt in dieser Bauweise **Druckkräfte** auf, während der Stahl für die **Zugkräfte** verantwortlich ist. Die Kombination der beiden Materialien ermöglicht hoch belastbare Decken- sowie Wandelemente. Der hohe Zementanteil im Beton gewährleistet den festen Verbund der beiden Komponenten, verursacht jedoch aufgrund der energieintensiven Herstellung gleichzeitig einen hohen CO₂-Ausstoß. Gegenüber Holz bestehen Vorteile im **Brand-** und **Schallschutz**. Das **hohe Eigengewicht** sowie die klimaunverträgliche Herstellung können das Aufstockungspotenzial allerdings **reduzieren**, wie in den nachfolgenden Kapiteln 5 und 6 untersucht wird.⁵⁷

4.3.2 Stahlbeton mit Ökobeton

In dieser Betrachtung werden die ökologischen Vorteile von **CO₂-reduzierten Beton** analysiert. Der nachhaltige Beton, auch als **Ökobeton** bekannt, dient dazu, den CO₂-Fußabdruck im Vergleich zu herkömmlichem Standardbeton zu verringern. Dies wird durch den Einsatz von **klinkerreduzierten Zementen** erreicht, bei denen ein Teil des Klinkers durch Sekundärrohstoffe wie Hüttensand, Flugasche oder Kalksteinmehl ersetzt wird. Diese Substitution führt zu einer CO₂-Reduzierung in der Betonzusammensetzung. In dieser Arbeit kommt der **Holcim EcoPact Beton** für Wände und Decken zum Einsatz. Dieser ist für alle Bauteile im Hochbau geeignet und kann in unterschiedlichen Druckfestigkeitsklassen angewendet werden.⁵⁸

⁵⁷ Vgl. Borbe, André: Stahlbeton: Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, 02.12.2024, (URL 15) (15.12.2024, 13:00).

⁵⁸ Vgl. Holcim: Nachhaltige betone, 2024, (URL 16) (15.12.2024, 12:17).

4.3.3 Stahlbeton mit Recyclingbeton

Eine weitere nachhaltige Alternative zum herkömmlichen Normalbeton bildet **Recyclingbeton**, der aus Abbruchmaterialien alter Gebäude hergestellt wird. Diese werden in Brechanlagen zerkleinert, von Schadstoffen bereinigt und in Korngrößen sortiert. So entstehen rezyklierte Gesteinskörnungen wie Splitt oder Kies, die natürliche Gesteinskörnungen ersetzen, um Primärressourcen einzusparen. Recyclingbeton bildet eine Innovation aus der ‚**Urban-Mining**‘-Strategie, bei der die gebaute Umwelt als sekundäre Ressourcenquelle genutzt wird. Der Recyclingbeton ist bislang nur bis zur **Druckfestigkeitsklasse C30/37** einsetzbar. Die Wahl von Recyclingbeton spart Ressourcen und reduziert den CO₂-Fußabdruck. Das globale Erwärmungspotenzial für Stahlbetondecken und -wände mit Recyclingbeton wird in Kapitel 5 untersucht.

In Kapitel 6 wird Recyclingbeton EcoPact R **nicht** berücksichtigt, da die Preise von projektspezifischen Anforderungen abhängig sind und deshalb vom Hersteller keine Preisauskunft gegeben werden kann.⁵⁹

4.3.4 Spannbeton-Fertigdecke

Spannbeton-Fertigdecken zeichnen sich durch ihre hohe Tragfähigkeit und **Materialeffizienz** aus. Aufgrund der Hohlraumgrößen und der Vorspannung eignen sie sich für lange Spannweiten bei einem **geringen Eigengewicht**. Sie erfüllen die Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten. Spannbeton-Fertigdecken sind ressourcenschonend dank des geringen Einsatzes von Beton und Stahl. Der Einsatz von Spannbeton-Fertigdecken hat außerdem eine flexible Grundrissgestaltung und geringe Schadstoffemissionen zum Vorteil. **Plattendicken von 15 bis 40 cm** sind bei Spannbeton-Fertigdecken möglich. In dieser Forschungsarbeit wird analysiert, welche Vorteile diese Decken hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der CO₂-Bilanz bieten.⁶⁰

⁵⁹ Vgl. ebd.

⁶⁰ Vgl. DW-Systembau: Wirtschaftlich. nachhaltig. schnell. Wandelbar, o. J., (URL 17) (16.12.2024, 16:41).

5 CO₂-Bilanzierung

5.1 Festlegung des Ziel- und Untersuchungsrahmens

Die Ökobilanz in dieser Arbeit wird auf die CO₂-Bilanzierung beschränkt, um das **globale Erwärmungspotenzial** der verschiedenen Wand- sowie Deckenvarianten zu ermitteln, die für die fiktive Aufstockung in Unterkapitel 4.2 ausgewählt wurden. Das Ziel bildet es, am Ende der Berechnung eine Gegenüberstellung aufzustellen und auszuwerten, welche Varianten sich für eine nachhaltige Aufstockung am ehesten eignen.

5.2 Erstellung einer Sachbilanz

5.2.1 Datengrundlage

Die ermittelten GWP (Global Warming Potential)-Einheitswerte basieren auf den in Deutschland verfügbaren Datenbanken **Ökobaudat** und **EPD** (Environmental Product Declaration). Die Referenzeinheiten der entnommenen Werte beziehen sich auf das Volumen (m³) und das Gewicht (t). Für die Varianten im Massivbau wurden Normalbetone und nachhaltige Betone verwendet. Beiden Datenbanken wurden nur die Werte für die **Module A1–A3 und C3** entnommen, da zum heutigen Stand die Werte dieser Module am aussagekräftigsten sind. Die Module A4–A5, B und D weisen eine lückenhafte Datengrundlage auf und werden in den nachfolgenden Berechnungen **nicht** berücksichtigt (vgl. Tabelle 3–4).

Material	GWP-Referenzeinheit	Herstellung A1-A3	Abfallbehandlung C3	Summe A1-A3 + C3	Rohdichte [kg/m ³]
Konstruktionsvollholz aus Nadelholz	kg CO ₂ -Äq./m ³	-727	816	89	492,92
OSB Platte	kg CO ₂ -Äq./m ³	-639,63	983,2	343,57	600
Brettspertholz	kg CO ₂ -Äq./m ³	-669,6	798,7	129,1	489,41
Brettschichtholz	kg CO ₂ -Äq./m ³	-668,2	825,6	157,4	507,11
Verzinkte Schrauben	kg CO ₂ -Äq./m ³	3,461	0	3,461	

Tabelle 3 GWP-Einheitswerte für die Holzbauweise⁶¹

⁶¹ Eigene Darstellung.

Material	GWP-Referenzeinheit	Herstellung A1-A3	Abfallbehandlung C3	Summe A1-A3 + C3	Rohdichte [kg/m³]
Transportbeton C30/37	kg CO ₂ -Äq./m³	257,70	14,90	272,60	2.306,00
Beton C30/37 Eco Pact, Holcim	kg CO ₂ -Äq./m³	168,40	3,848	172,25	2.292,00
Beton C30/37 Eco Pact R, Holcim	kg CO ₂ -Äq./m³	177,90	3,632	181,53	2.274,00
Beton C50/60	kg CO ₂ -Äq./m³	275,00	5,05	280,05	2.400,00
Spannbetonfertigteildecke A20B	kg CO ₂ -Äq./m²	43,10	0,56	43,66	319,00
Vergussbeton C20/25	kg CO ₂ -Äq./m³	157,00	5,05	162,05	2.400,00
Betonstahlmatten	kg CO ₂ -Äq./to	544,00	0	544,00	7.850,00
Betonstabstahl	kg CO ₂ -Äq./to	474,00	0	474,00	7.850,00

Tabelle 4 GWP-Einheitswerte für die Massivbauweise⁶²

5.2.2 Mengenermittlung

Als Vorbereitung auf die nachfolgende Mengenermittlung wurden in Kapitel 4 die Mengen aus dem in Abbildung 12 dargestellten Grundriss ermittelt. Die daraus resultierenden Angaben über die Wand- und die Deckenfläche werden mit den Materialmengen der Bauteilkomponenten verrechnet. Sie dienen folglich als Grundlage für die CO₂-Bilanzierung. Für die CO₂-Bilanzierung werden nur die Materialmengen der tragenden Konstruktion kalkuliert, d. h. die **Außenwände** und die **Decken**. Eine detaillierte Mengenermittlung zu den Wand- sowie Deckenvarianten befindet sich in Anhang 3 und 4.

5.2.2.1 Holztafelbauwand

Die Materialmengen für die Holztafelwand basieren auf **16 cm** tiefen und **8 cm** breiten Holzständern sowie einem Rähm und einer Schwelle mit jeweils **1,25 m** Breite und **8 cm** Höhe. Die Holztafelwand wird innen- und außenseitig mit OSB-3-Platten (jeweils **2 cm** dick) zur Aussteifung beplankt. Für die Wandfläche von **122,30 m²** ergeben sich somit circa **3,5 m³** Konstruktionsvollholz und **4,90 m³** OSB-Bepunktung. Das Gewicht der Holztafelwände beträgt insgesamt **4,64 Tonnen** (vgl. Tabelle 5).

Bauteilkomponente	Material	Menge / Wandfläche [m³/m²]	Wandfläche [m²]	Menge [m³]	Rohdichte [kg/m³]	Gewicht [t]
Horizontale + Vertikale Rippen	KVH aus Nadelholz	0,028	122,30	3,446	492,92	1,699
Bepunktung beidseitig (2 x 20mm)	OSB	0,040	122,30	4,892	600,00	2,935

Tabelle 5 Mengenermittlung Holztafelwand⁶³

⁶² Eigene Darstellung.

⁶³ Eigene Darstellung.

Die Materialmengen der Befestigungsmittel werden in den nachfolgenden Berechnungen nicht berücksichtigt, da diese im Mengenverhältnis eine untergeordnete Rolle spielen. Bei einer plausiblen Annahme von 0,5 kg/m² an verzinkten Schrauben ergibt sich eine Menge von **61,15 kg** für die gesamte Wandfläche von 122,30 m².

5.2.2.2 Brettschichtholz- und Brettsperrholzwand

Für die Materialmengen der Brettschichtholzwand und der Brettsperrholzwand wurde dieselbe Holzmenge ermittelt. Die Bauteildicke wurde für beide Wandvarianten auf **20 cm** festgelegt. Daraus ergibt sich bei **0,20 m³/m²** eine Menge von circa **25,5 m³** an Brettschichtholz und Brettsperrholz. Der Leimanteil wurde in dieser Berechnung nicht berücksichtigt, da er mit 3–5 % vernachlässigt werden kann.⁶⁴ Das **Gewicht** beträgt für die **Brettschichtholzwände** insgesamt **12,40 Tonnen** und für die **Brettsperrholzwände** circa **zwölf Tonnen** (vgl. Tabelle 6).

Variante	Material	Menge / Wandfläche [m ³ /m ²]	Wandfläche [m ²]	Menge [m ³]	Rohdichte [kg/m ³]	Gewicht [t]
Brettschichtholzwand	Brettschichtholz	0,20	122,30	24,461	507,11	12,404
Brettsperrholzwand	Brettsperrholz	0,20	122,30	24,461	489,41	11,971

Tabelle 6 Materialmengenermittlung Brettschichtholz- und Brettsperrholzwand⁶⁵

5.2.2.3 Stahlbetonwand

Die Materialmengenermittlung der Stahlbetonwände mit einer Bauteildicke von **20 cm** ergab eine **Stahlmenge** von **2,5 Tonnen** und bei einem Normalbeton der Betongüte **C30/37** eine Menge von **25 m³**. Die Mengen für den **Ökobeton** und den **Recyclingbeton** bleiben unverändert. Die Stahlbetonwände werden mit Betonstahlmatten als flächige Wandbewehrung bewehrt. Die Bewehrungsmenge wird mit **durchschnittlichen 100 kg/m³** bei Wänden angenommen und berechnet. Das **Gewicht** der Stahlbetonwände beträgt insgesamt circa **59 Tonnen** (vgl. Tabelle 7-8).

⁶⁴ Vgl. Sobek, 2022, S. 93.

⁶⁵ Eigene Darstellung.

Bauteilkomponente	Material	Menge / Wandfläche [m³/m²]	Wandfläche [m²]	Menge [m³]	Rohdichte [kg/m³]	Gewicht [t]
Beton	C30/37	0,20	122,30	24,461	2.306	56,405
Ökobeton	EcoPact C30/37	0,20	122,30	24,461	2.292	56,062
Recyclingbeton	EcoPact R C30/37	0,20	122,30	24,461	2.274	55,62

Tabelle 7 Materialmengenermittlung Stahlbetonwand⁶⁶

Bauteilkomponente	Material	Menge [m³]	Bewehrungsgehalt [kg/m³]	Menge [t]
Stahl	Betonstahlmatten B500A (Q524 A)	24,460	100	2,446

Tabelle 8 Materialmengenermittlung Stahlbetonwand Bewehrungsanteil⁶⁷

5.2.2.4 Brettschichtholz- und Brettsperrholzdecke

Für die Aufstockung werden zum einen Brettschichtholzdecken und zum anderen Brettsperrholzdecken verwendet. In Kapitel 4 wurde im Rahmen einer Entwurfsstatik die Bauteildicke für die **Brettschichtholzdecke** mit **20 cm** und für die **Brettsperrholzdecke** mit **24 cm** festgelegt. Für die **Brettschichtholzdecke** ergibt sich eine Holzmenge von circa **25,5 m³** und für die **Brettsperrholzdecke** von circa **30,6 m³**. Über die gesamte Deckenfläche beträgt das Gewicht der Brettschichtholzdecke circa **14,96 Tonnen** und der Brettsperrholzdecke **circa 12,91 Tonnen** (vgl. Tabelle 9).

Deckenart	Material	Menge / Deckenfläche [m³/m²]	Deckenfläche [m²]	Menge [m³]	Rohdichte [kg/m³]	Gewicht [t]
Brettsperrholzdecke	Brettsperrholz	0,24	127,32	30,557	489,41	14,955
Brettstapeldecke	Brettschichtholz	0,20	127,32	25,464	507,11	12,913

Tabelle 9 Materialmengenermittlung Brettsperrholz- und Brettstapelholzdecke⁶⁸

5.2.2.5 Lignatur-Kastendecke

Die Lignatur-Kastendecke mit **1,00 m** Elementbreite setzt sich aus vertikalen und horizontalen Trägern zusammen. Die Träger bestehen aus Konstruktionsvollholz. Für die Deckenstärke wurde in der Entwurfsstatik in Kapitel 4 eine **Bauteildicke von 25 cm** festgelegt. Über die gesamte Deckenfläche beträgt das Gewicht der Lignaturdecke circa **5,6 Tonnen** (vgl. Tabelle 10).

⁶⁶ Eigene Darstellung.

⁶⁷ Eigene Darstellung.

⁶⁸ Eigene Darstellung.

Bauteilkomponenten	Material	Menge/Deckenfläche [m³/m²]	Deckenfläche [m²]	Menge [m³]	Rohdichte [kg/m³]	Gewicht [t]
Vertikale Träger	KVH aus Nadelholz	0,039	127,32	4,934	492,92	2,432
Horizontale Träger	KVH aus Nadelholz	0,052	127,32	6,670	492,92	3,288
Summe		0,091	127,32	11,604	492,92	5,719

Tabelle 10 Materialmengenermittlung Kastendecke-Lignatur⁶⁹

5.2.2.6 Holzbetonverbunddecke

Die Holzbetonverbunddecke mit einer Gesamtstärke von **23 cm** setzt sich aus einer **Brettstapelholzdecke**, bestehend aus circa **19,10 m³ Konstruktionsvollholz**, und **10,19 m³ Beton** der **Betongüte C50/60** bei einer **8 cm** dicken **Aufbetonschicht** zusammen. Für die Bewehrung wurden **Betonstahlmatten** der Kategorie B500A ausgewählt. Die Bewehrungsmenge beträgt **109,65 kg/m³**. Der Bewehrungsanteil der Holzbetonverbunddecke umfasst circa **1,2 Tonnen Stahl**. Über die gesamte Deckenfläche beträgt das Gewicht der Holzbetonverbunddecke circa **35 Tonnen** (vgl. Tabelle 11–12).

Bauteilkomponente	Material	Menge/ Wandfläche [m³/m²]	Deckenfläche [m²]	Menge [m³]	Rohdichte [kg/m³]	Gewicht [t]
Brettstapelholzdecke	KVH aus Nadelholz	0,15	127,32	19,098	492,92	9,413
Bauteilkomponente	Material	Menge/ Wandfläche [m³/m²]	Deckenfläche [m²]	Menge [m³]	Rohdichte [kg/m³]	Gewicht [t]
Aufbeton	C50/60	0,08	127,32	10,186	2.400	24,445

Tabelle 11 Materialmengenermittlung Holzbetonverbunddecke⁷⁰

Bauteilkomponente	Material	Menge [m³]	Bewehrungsgehalt [kg/m³]	Menge [t]
Stahl	Betonstahlmatten B500A	10,186	109,65	1,117

Tabelle 12 Materialmengenermittlung Holzbetonverbunddecke Bewehrungsanteil⁷¹

⁶⁹ Eigene Darstellung.

⁷⁰ Eigene Darstellung.

⁷¹ Eigene Darstellung.

5.2.2.7 Stahlbeton-Flachdecke

Die Materialmengenermittlung für die Stahlbetonflachdecken mit einer Bauteildicke von **28 cm** ergab eine **Stahlmenge** von circa **4,46 Tonnen**. Bei einem Normalbeton der **Betongüte C30/37** beträgt die ermittelte **Betonmenge 35,7 m³**. Die Betonmenge bleibt für den Einsatz von **Ökobeton** und **Recyclingbeton** unverändert. Das Gewicht der Stahlbetonflachdecke erreicht insgesamt circa **86,66 Tonnen** (vgl. Tabelle 13–14).

Bauteilkomponente	Material	Menge / Wandfläche [m ³ /m ²]	Deckenfläche [m ²]	Menge [m ³]	Rohdichte [kg/m ³]	Gewicht [t]
Beton	C30/37	0,28	127,32	35,650	2.306	82,208
Ökobeton	EcoPact C30/37	0,28	127,32	35,650	2.292	81,709
Recyclingbeton	EcoPact R C30/37	0,28	127,32	35,650	2.274	81,068

Tabelle 13 Materialmengenermittlung für Stahlbetonflachdecke⁷²

Bauteilkomponente	Material	Menge [m ³]	Bewehrungsgehalt [kg/m ³]	Menge [t]
Stahl	Betonstabstahl	35,650	125	4,456

Tabelle 14 Materialmengenermittlung Stahlbeton-Flachdecke mit Bewehrungsanteil⁷³

5.2.2.8 Spannbeton-Fertigdecke

Für die nachfolgende CO₂-Bilanzierung der Spannbeton-Fertigteildecke wurde der Deckentyp **A20B** der DW-Systembau GmbH mit **20 cm Deckenstärke** und einer Elementlänge von **1200 mm** ausgewählt. Der Vollmaterialanteil mit circa **60 %** besteht aus einem **Beton** der Festigkeitsklasse **C40/45** und aus Spannstahl der Zugfestigkeit 1570/1770. Der **Luftanteil** der Hohlräume liegt bei circa **40 %**. Gemäß Herstellerangaben wurde für die genaue Berechnung ein Fugen-Verguss von **0,9675 m³** mit Beton der Festigkeitsklasse **C20/25** ermittelt. Das **Flächengewicht** beträgt **319 kg/m²**; daraus ergibt sich das Gewicht der Spannbeton-Fertigteildecke mit **40,62 Tonnen**. In der Umweltproduktdeklaration der Spannbeton-Fertigteildecke sind die GWP-Einheitswerte in kg CO₂-Äquivalente/m² angegeben, weshalb sie direkt mit der Deckenfläche verrechnet werden können. In Anhang 5 befinden sich die Herstelleranfrage sowie die Vorbemessung zur gewählten Spannbeton-Fertigdecke.

⁷² Eigene Darstellung.

⁷³ Eigene Darstellung.

5.3.2 Holzbauwände

5.3.2.1 Holztafelwand

Beim Bau der Wände aus Holztafelwänden werden in den Lebenszyklusphasen **A1–A3** insgesamt **5.421 kg CO₂** gespeichert. In der Phase **C3** werden **7.622 kg CO₂** freigesetzt. **Kombiniert** stößt die Ausführung der Wände mit Holztafelwänden in den Lebenszyklusphasen A1–A3 + C3 **2.201 kg CO₂** aus. Bezogen auf die **BGF** (Brutto-Grundfläche) von 127,32 m² entspricht das **17,29 kg CO₂/m²**.

Die Befestigungsmittel betragen hier **212 kg CO₂** und spielen damit eine untergeordnete Rolle. In den nachfolgenden Berechnungen werden die Befestigungsmittel nicht weiter berücksichtigt (vgl. Abbildung 15).

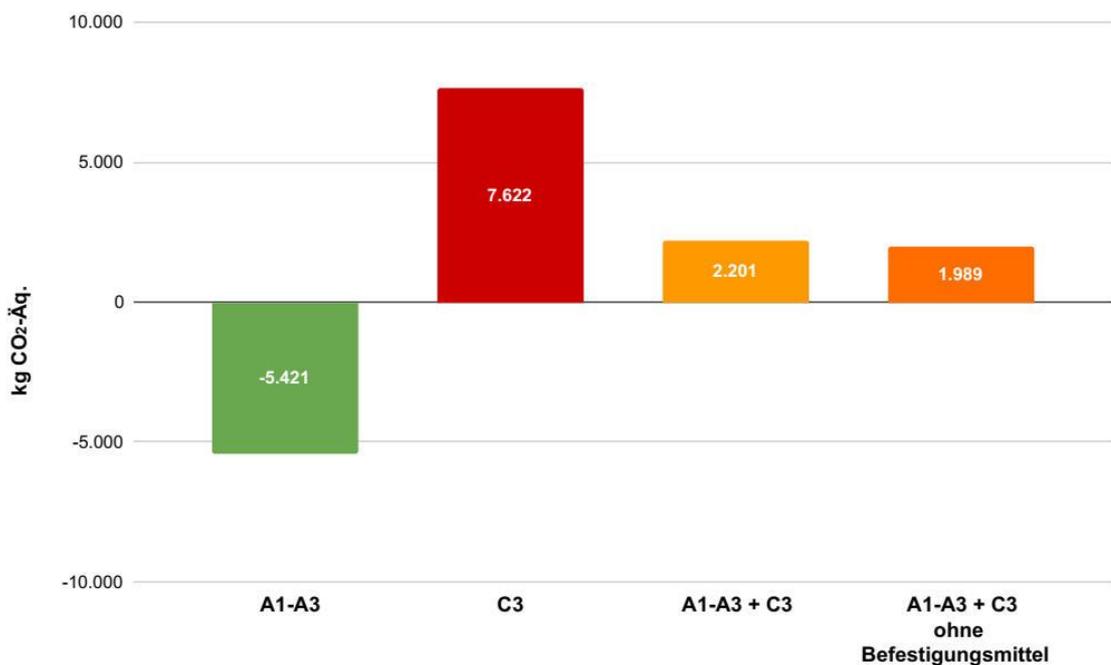


Abbildung 15 GWP-Berechnung Holztafelwände⁷⁵

⁷⁵ Eigene Darstellung.

5.3.2.2 Brettsperrholzwand

Mit der Ausführung der Wände aus Brettsperrholz werden in der **Herstellungsphase** (A1–A3) insgesamt **16 379 kg CO₂** in den Wänden gebunden. In der **Abfallbehandlung** (C3) werden **19 537 kg CO₂** freigesetzt. Die negativen CO₂-Emissionen aus der Herstellungsphase werden durch die Abfallbehandlung in der Lebenszyklusphase C3 positiv und emittieren in Summe **3.158 kg CO₂**. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **24,80 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 16).

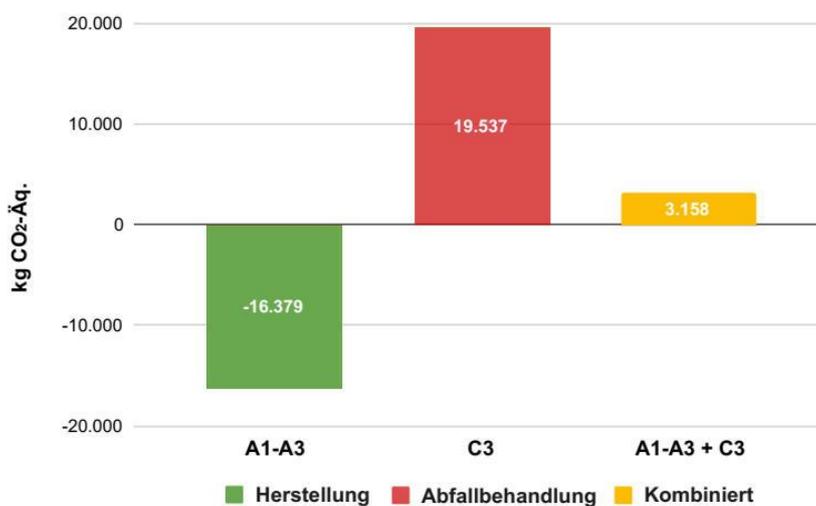


Abbildung 16 GWP-Berechnung Brettsperrholzwand⁷⁶

5.3.2.3 Brettschichtholzwand

Bei einer Brettschichtholzwand werden in den Lebenszyklusphasen **A1–A3** insgesamt **16.345 kg** gespeichert und in der Phase **C3 20.195 kg CO₂** emittiert. Kombiniert stößt die Ausführung der Wände mit Brettschichtholz über die Lebenszyklusphasen **A1–A3 + C3** hinweg **3.850 kg CO₂** aus. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **30,24 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 17).

⁷⁶ Eigenen Darstellung.

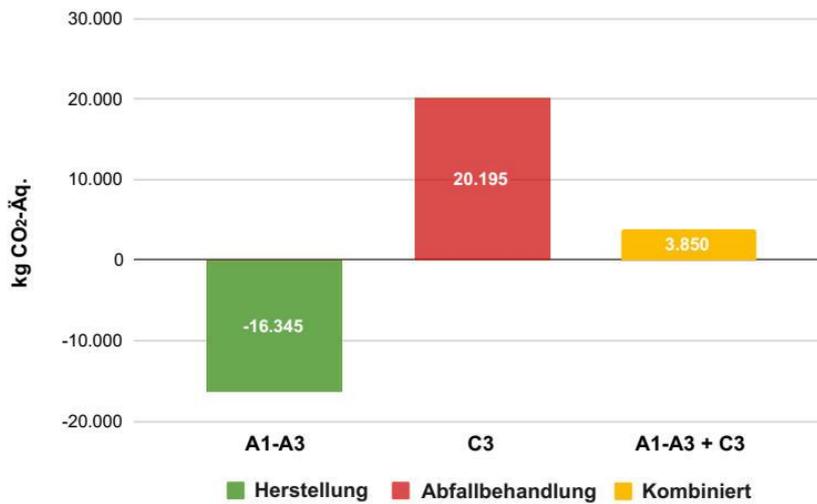


Abbildung 17 GWP-Berechnung Brett-schichtholz-wand⁷⁷

5.3.3 Holzbaudecken

5.3.3.1 Brett-schichtholz-decke

Beim Bau der Decken aus Brett-schichtholz werden in den Lebenszyklusphasen **A1–A3** insgesamt **17.015 kg CO₂** gespeichert und in der Lebenszyklusphase **C3** **21.023 kg CO₂** freigesetzt. **In Summe** emittieren die Phasen A1–A3 + C3 mit Brett-schichtholz insgesamt **4.008 kg CO₂**. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **31,48 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 18).

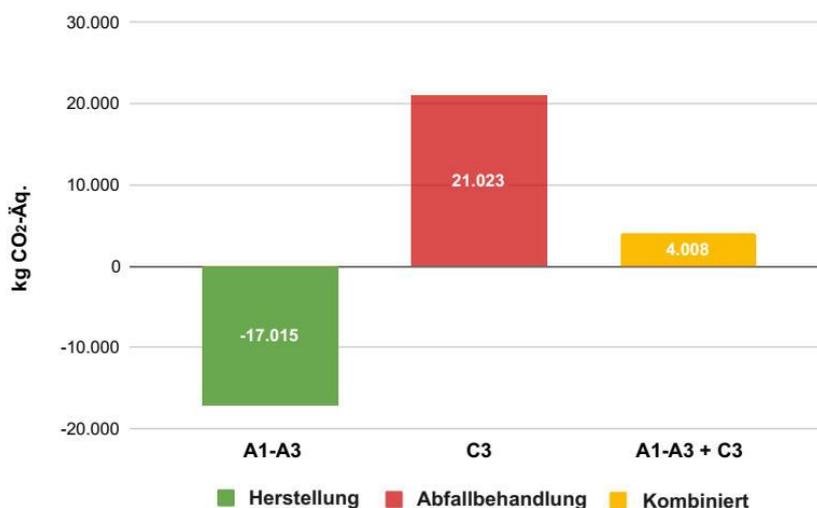


Abbildung 18 GWP-Berechnung Brett-schichtholz-decke⁷⁸

⁷⁷ Eigene Darstellung.

⁷⁸ Eigene Darstellung.

5.3.3.2 Brettsperrholzdecke

Die Brettsperrholzdecke bindet in den Lebenszyklusphasen **A1–A3 20.461 kg CO₂**, während in der Abfallbehandlung **C3 24.406 kg CO₂** freigesetzt werden. Über alle Phasen (**A1–A3 + C3**) ergibt sich ein Ausstoß von **3.945 kg CO₂**, was bezogen auf die BGF von 127,32 m² **30,98 kg CO₂/m²** entspricht. (vgl. Abbildung 19).

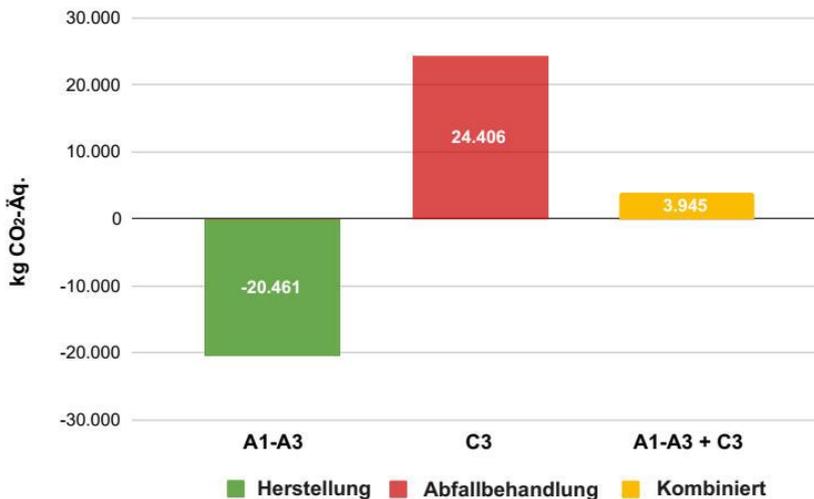


Abbildung 19 GWP-Berechnung Brettstapelholzdecke⁷⁹

5.3.3.3 Lignatur-Kastendecke

Die Lignaturdecke speichert in den Lebenszyklusphasen **A1–A3** insgesamt **8.436 kg CO₂** und setzt in der Phase **C3 9.469 kg CO₂** in die Atmosphäre frei. **In Summe** emittieren die Phasen **A1–A3 + C3, 1.033 kg CO₂**. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **8,11 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 20).

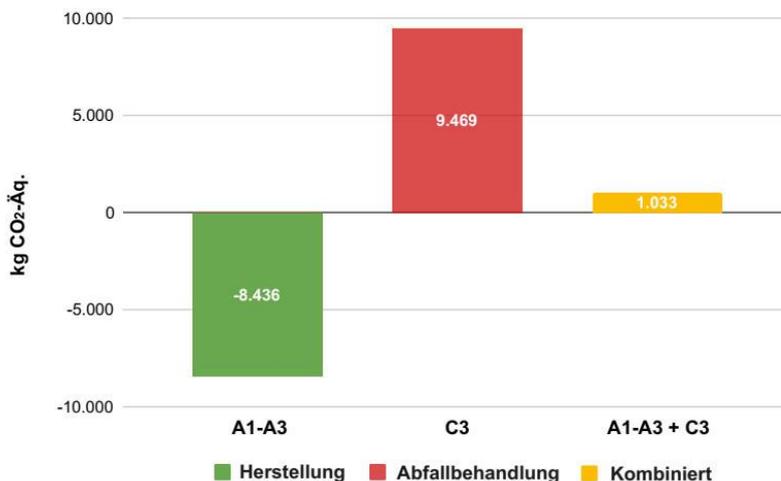


Abbildung 20 GWP-Berechnung Lignaturdecke⁸⁰

⁷⁹ Eigene Darstellung.

⁸⁰ Eigene Darstellung.

5.3.3.4 Holzbetonverbunddecke

Das Synergieprodukt der Holzbetonverbunddecke bindet in der **Herstellungsphase** insgesamt **10.475 kg CO₂**. In der **Abfallbehandlung** ist die Holzbetonverbunddecke für Emissionen von **15.635 kg CO₂** verantwortlich. **Kumuliert** werden über alle Lebenszyklusphasen hinweg somit **5.160 kg CO₂** emittiert. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **40,53 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 21).

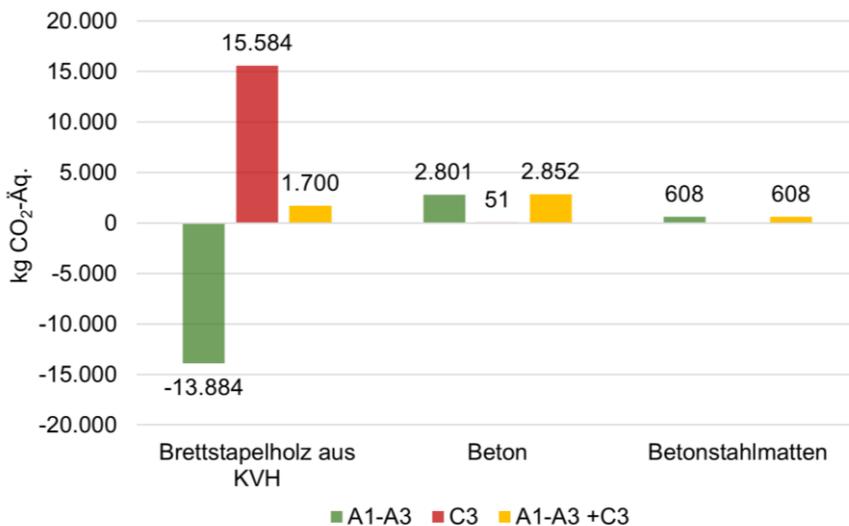


Abbildung 21 GWP-Berechnung Holzbetonverbunddecke⁸¹

Über alle Lebenszyklusphasen hinweg hat die Aufbetonschicht bei der Holzbetonverbunddecke mit **55 %** den höchsten Anteil an den freigesetzten CO₂-Emissionen. Die Brettstapelholzdecke aus Konstruktionsvollholz ist für **33 %** verantwortlich, während die Bewehrung nur einen **12%igen** Anteil an den gesamten CO₂-Emissionen ausmacht (vgl. Abbildung 22).

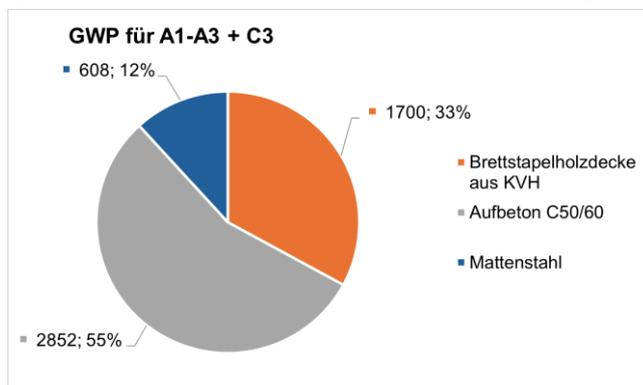


Abbildung 22 GWP-Berechnung Holzbetonverbunddecke⁸²

⁸¹ Eigene Darstellung.

⁸² Eigene Darstellung.

5.3.4 Massivwände

5.3.4.1 Stahlbetonwand mit Normalbeton

Die Stahlbetonwände bestehen aus den Bauteilkomponenten Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37 und einer flächigen Wandbewehrung mit Betonstahlmatten der Bezeichnung B500A. In der CO₂-Bilanz ist der Beton für **6.304 kg CO₂** während der Lebenszyklusphase **A1-A3** verantwortlich. Der verbaute Stahl mit **1.331 kg CO₂** hat einen deutlich niedrigeren Anteil der emittierten CO₂-Emissionen. Für die Phase **C3** emittiert der Beton als alleiniger Emittent **364 kg CO₂**. **In Summe** werden für Beton und Stahl insgesamt **7.999 kg CO₂** in die Atmosphäre freigesetzt. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **62,83 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 23).

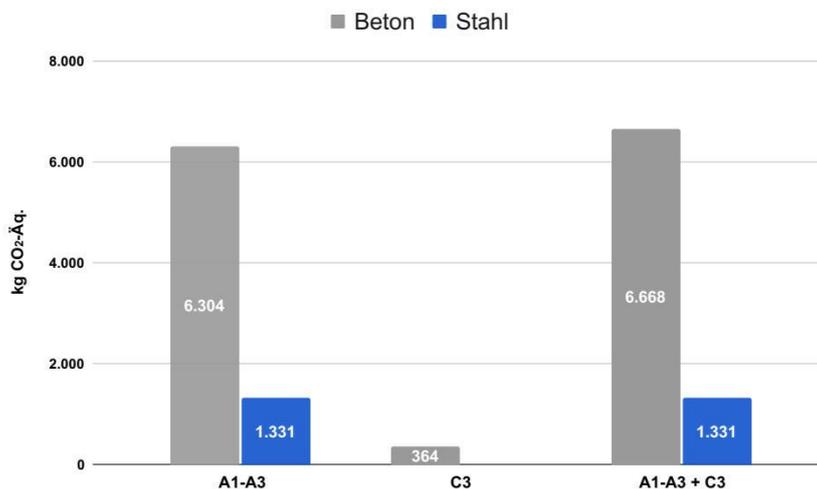


Abbildung 23 GWP-Berechnung Holzbetonverbunddecke⁸³

In Abbildung 35 wird gezeigt, dass in den Phasen A1–A3 + C3 die Betonstahlmatten einen Anteil von **16,6 %** ausmachen, während der Beton **83,4 %** verantwortet.

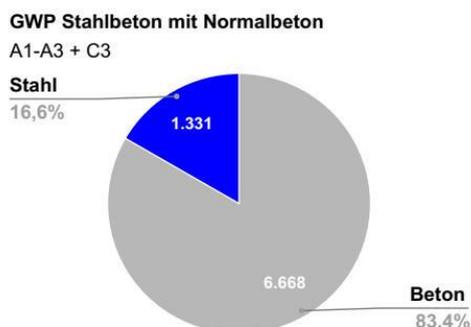


Abbildung 24 Materialanteile an den gesamten CO₂-Emissionen⁸⁴

⁸³ Eigene Darstellung.

⁸⁴ Eigene Darstellung.

5.3.4.2 Stahlbetonwand mit Ökobeton

In dieser CO₂-Bilanz wird anstelle von Normalbeton ein nachhaltiger Beton bzw. Ökobeton eingesetzt. Die Bewehrung ist identisch zur vorherigen Berechnung. Der Ökobeton setzt in der Phase **A1–A3 4.119 kg CO₂** frei. Die emittierten CO₂-Emissionen der Bewehrung sind gleichgeblieben. In der Phase **C3** emittiert der Ökobeton als alleiniger Emittent **94 kg CO₂**. In Summe werden von Beton und Stahl insgesamt **5.554 kg CO₂** in die Atmosphäre freigesetzt. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **43,62 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 25).

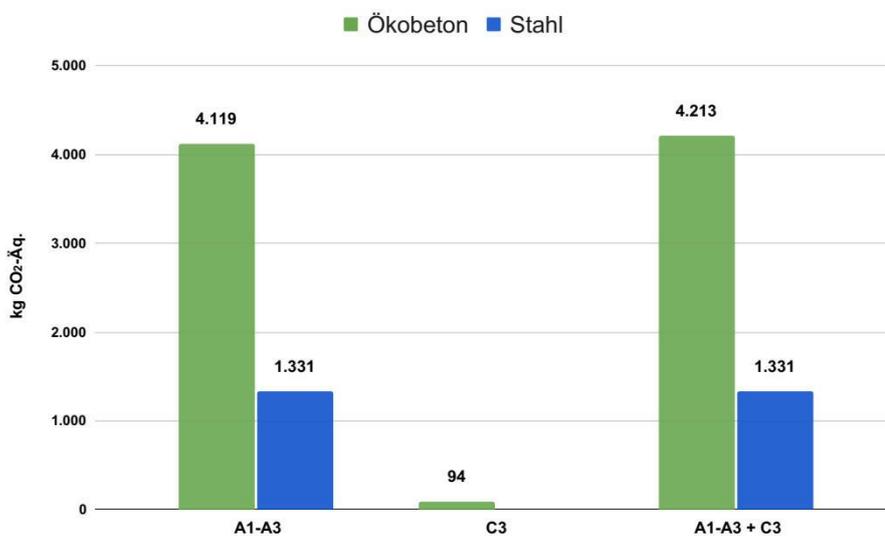


Abbildung 25 GWP-Berechnung Stahlbetonwand mit Ökobeton⁸⁵

Abbildung 26 ist zu entnehmen, dass in den Phasen A1–A3 + C3 die Betonstahlmatten einen Anteil von **24 %** ergeben, während der Ökobeton für **76 %** verantwortlich ist.

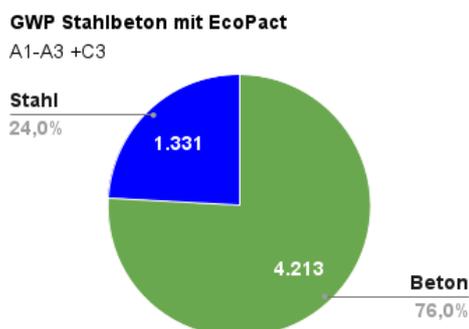


Abbildung 26 Materialanteile an den gesamten CO₂-Emissionen⁸⁶

⁸⁵ Eigene Darstellung.

⁸⁶ Eigene Darstellung.

5.3.4.3 Stahlbetonwand mit Recyclingbeton

Neben dem Einsatz von Ökobeton wird auch der Recyclingbeton untersucht. Dafür wird die identische Bewehrung verwendet. Der Recyclingbeton setzt in der Phase **A1–A3 4.351 kg CO₂** in die Atmosphäre frei. Die induzierten CO₂-Emissionen der Bewehrung sind gleichgeblieben. In der Phase **C3** emittiert der Recyclingbeton als alleiniger Emittent **89 kg CO₂**. **In Summe** werden für Beton und Stahl insgesamt **5.771 kg CO₂** in die Atmosphäre freigesetzt. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **45,33 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 27).

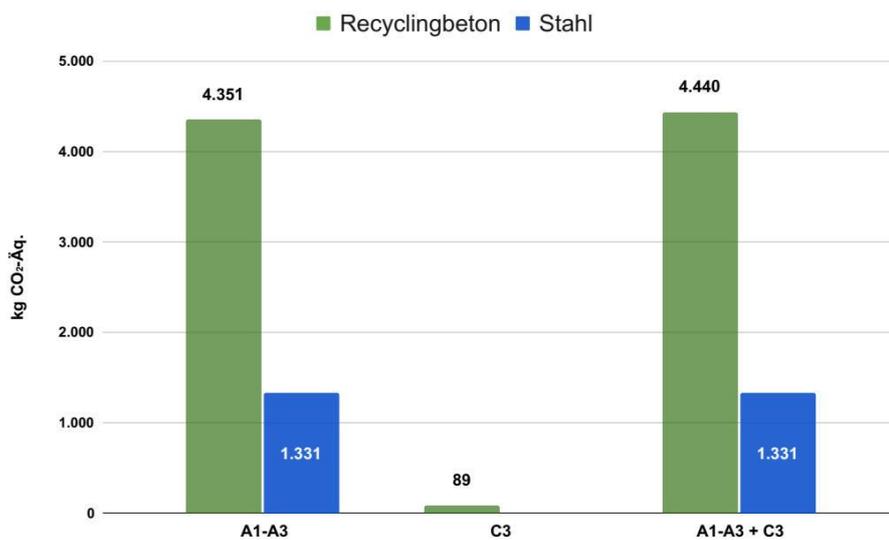


Abbildung 27 GWP-Berechnung Stahlbetonwand mit Recyclingbeton⁸⁷

In Abbildung 28 ist zu sehen, dass in den Phasen A1–A3 + C3 die Betonstahlmatten einen Anteil von **23,1 %** ergeben, während der Ökobeton **76,9 %** verantwortet.

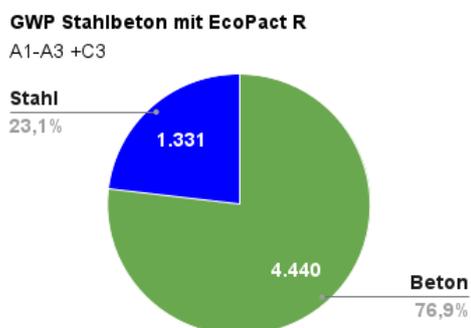


Abbildung 28 Materialanteile an den gesamten CO₂-Emissionen⁸⁸

⁸⁷ Eigene Darstellung.

⁸⁸ Eigene Darstellung.

5.3.5 Massivdecken

5.3.5.1 Stahlbeton-Flachdecke mit Normalbeton

Analog zu den Stahlbetonwänden wird für die Berechnung der Stahlbetondecke ein Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37 verwendet. Für die Bewehrung der Decke wird Betonstabstahl eingesetzt. In der CO₂-Bilanz ist der Beton für **9.187 kg CO₂** während der Lebenszyklusphase **A1–A3** verantwortlich. Der verbaute Stahl mit **2.112 kg CO₂** hat einen deutlich niedrigeren Anteil der emittierten CO₂-Emissionen. In Phase **C3** emittiert der Beton als alleiniger Emittent **531 kg CO₂**. In Summe werden für Beton und Stahl insgesamt **11.830 kg CO₂** in die Atmosphäre freigesetzt. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **92,92 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 29).

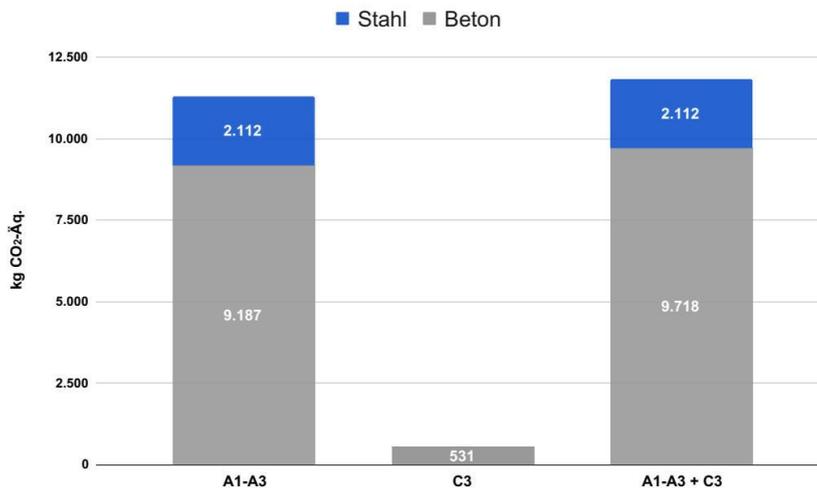


Abbildung 29 GWP-Berechnung Stahlbetondecke⁸⁹

In Abbildung 30 ist erkennbar, dass die Betonstahlmatten in den Phasen A1–A3 + C3 einen Anteil von **16,6 %** ausmachen, während der Beton **83,4 %** verantwortet.

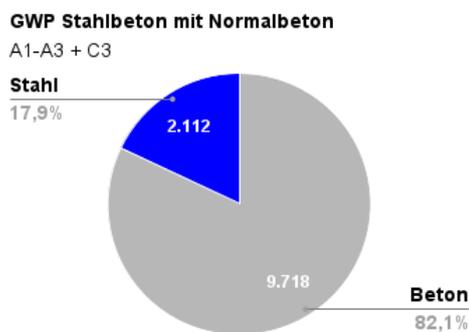


Abbildung 30 Materialanteile an den gesamten CO₂-Emissionen⁹⁰

⁸⁹ Eigene Darstellung.

⁹⁰ Eigene Darstellung.

5.3.5.2 Stahlbeton-Flachdecke mit Ökobeton

Für diese GWP-Berechnung wird ebenso der Ökobeton eingesetzt. Die Bewehrung ist identisch zur vorherigen Berechnung. Der Ökobeton setzt in der Phase **A1–A3** **6.003 kg CO₂** frei. Die emittierten CO₂-Emissionen der Bewehrung sind gleichgeblieben. In Phase **C3** emittiert der Ökobeton als alleiniger Emittent **137 kg CO₂**. In Summe werden für Beton und Stahl insgesamt **8.253 kg CO₂** in die Atmosphäre freigesetzt. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **64,82 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 31).

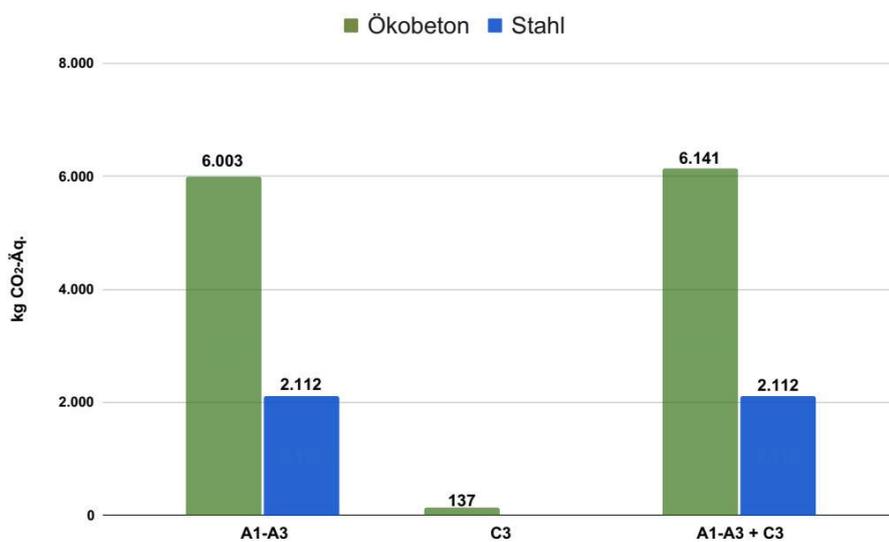


Abbildung 31 GWP-Berechnung Stahlbeton-Flachdecke mit Ökobeton⁹¹

In Abbildung 32 ist erkennbar, dass in den Phasen A1–A3 + C3 die Betonstahlmatten einen Anteil von **25,6 %** ergeben, während der Beton für **74,4 %** verantwortlich ist.

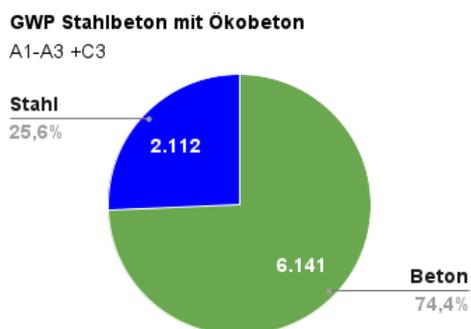


Abbildung 32 Materialanteile an den gesamten CO₂-Emissionen⁹²

⁹¹ Eigene Darstellung.

⁹² Eigene Darstellung.

5.3.5.3 Stahlbeton-Flachdecke mit Recyclingbeton

In dieser Berechnung wird für die gleiche Stahlbeton-Flachdecke der Einsatz von Recyclingbeton untersucht. Der Recyclingbeton setzt in der **Herstellungsphase 6.342 kg CO₂** frei. Die emittierten Treibhausgase für die Bewehrung sind gleichgeblieben. In der **Abfallbehandlung** stößt der Recyclingbeton als alleiniger Emittent **129 kg CO₂** aus. In Summe werden für Beton und Stahl insgesamt **8.584 kg CO₂** in die Atmosphäre freigesetzt. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **67,42 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 33).

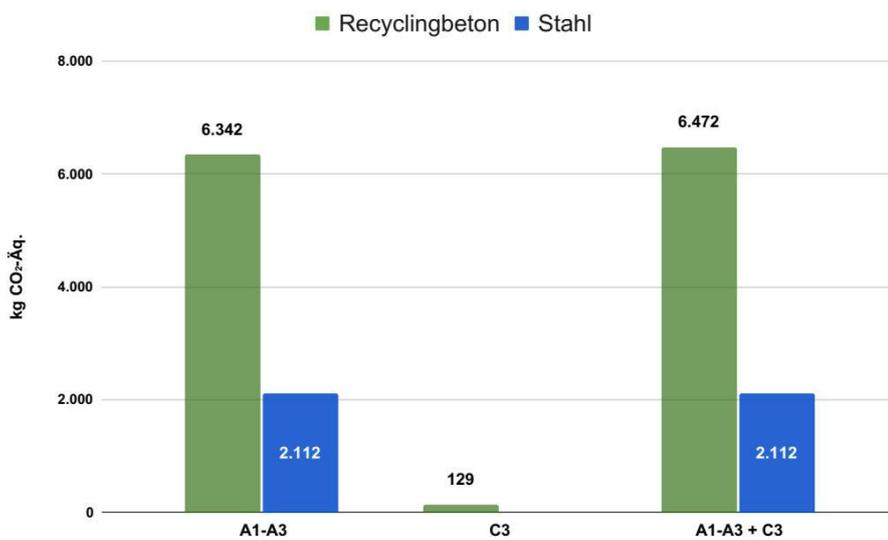


Abbildung 33 GWP-Berechnung Stahlbeton-Flachdecke mit Recyclingbeton⁹³

In Abbildung 34 ist erkennbar, dass in den Phasen A1–A3 + C3 die Betonstahlmatten einen Anteil von **24,6 %** ergeben, während der Beton für **75,4 %** verantwortlich ist.

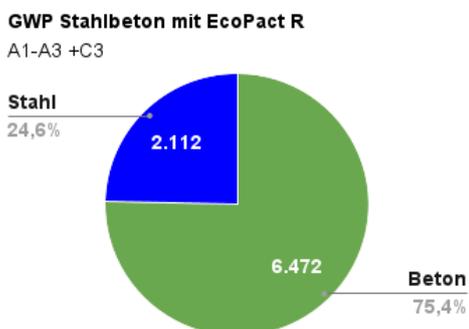


Abbildung 34 Materialanteile an den gesamten CO₂-Emissionen⁹⁴

⁹³ Eigene Darstellung.

⁹⁴ Eigene Darstellung.

5.3.5.4 Spannbeton-Fertigdecke

In der CO₂-Bilanzierung für die Spannbetondecke wurde in den Herstellungsphasen **A1–A3** das globale Erwärmungspotenzial mit **5.461 kg CO₂** ermittelt. In der Abfallbehandlung werden **76 kg CO₂** freigesetzt. **In Summe** werden in den Lebenszyklusphasen A1–A3 + C3 **5.717 kg CO₂** emittiert. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **44,90 kg CO₂/m²** (vgl. Abbildung 35).

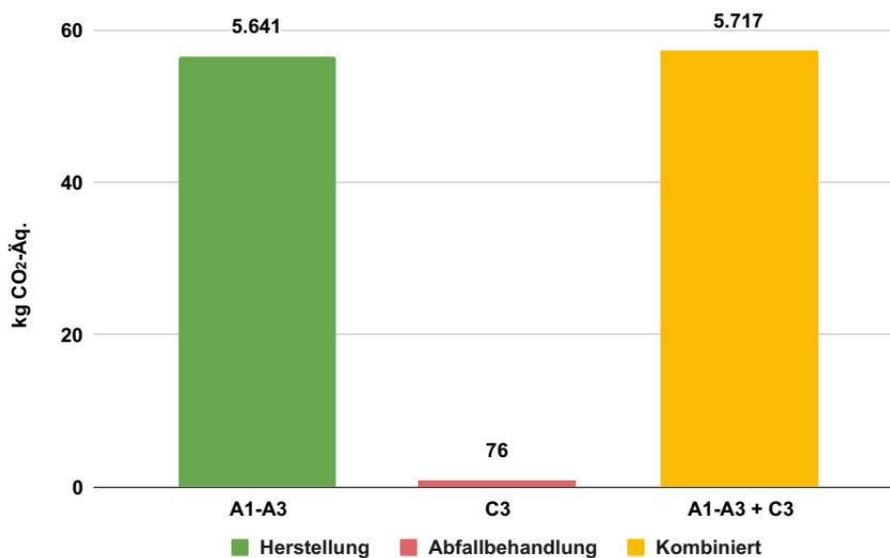


Abbildung 35 GWP-Berechnung Spannbeton Fertigteildecke⁹⁵

5.4 Gegenüberstellung der GWP-Ergebnisse

5.4.1 Wände

Die GWP-Berechnung der Wandvarianten lieferte folgende Erkenntnisse (vgl. Abbildung 36).

1. Für die Brettschichtholz wand wurden mit **-16.345 kg CO₂** in der Herstellungsphase und **20.195 kg CO₂** in der Abfallbehandlung nahezu die gleichen Ergebnisse wie bei der Brettsperrholzwand ermittelt. In Summe werden über alle Lebenszyklusphasen **3.850 kg CO₂** emittiert.
2. Die Brettsperrholzwand verfügt in der Herstellungsphase mit **16.379 kg CO₂**-über die **höchste** CO₂-Speichermenge, emittiert aber gleichzeitig in der

⁹⁵ Eigene Darstellung.

Abfallbehandlung **19.537 kg CO₂**. In Summe werden über alle Lebenszyklusphasen **3.158 kg CO₂** emittiert.

3. Mit **1.989 kg CO₂** weist die Holztafelwand in den Lebenszyklusphasen A1–A3 + C3 die beste CO₂-Bilanz auf. In den Phasen A1–A3 werden **5.421 kg CO₂** gebunden und in der Phase **C3** werden **7.622 kg CO₂** freigesetzt.
4. Die Stahlbetonwände mit **Normalbeton** wirken sich anders als die Holzwände in der Herstellungsphase negativ auf die Umwelt aus und emittieren **7.635 kg CO₂**, während in der Abfallbehandlung **364 kg CO₂** und kombiniert **7.999 kg CO₂** freigesetzt werden.
5. Durch den Einsatz von **Ökobeton** verringert sich das GWP in der Herstellungsphase um **2.185 kg CO₂** bzw. um **29 %** gegenüber der Stahlbetonvariante mit Normalbeton. Insgesamt werden kombiniert über alle Lebenszyklusphasen durch den Einsatz von Ökobeton **2.445 kg** weniger **CO₂** freigesetzt.
6. Der Einsatz von **Recyclingbeton** ist zwar ressourceneffizienter, emittiert dennoch in der CO₂-Bilanz in Summe aller Lebenszyklusphasen circa **217 kg CO₂** mehr als der **Ökobeton**.

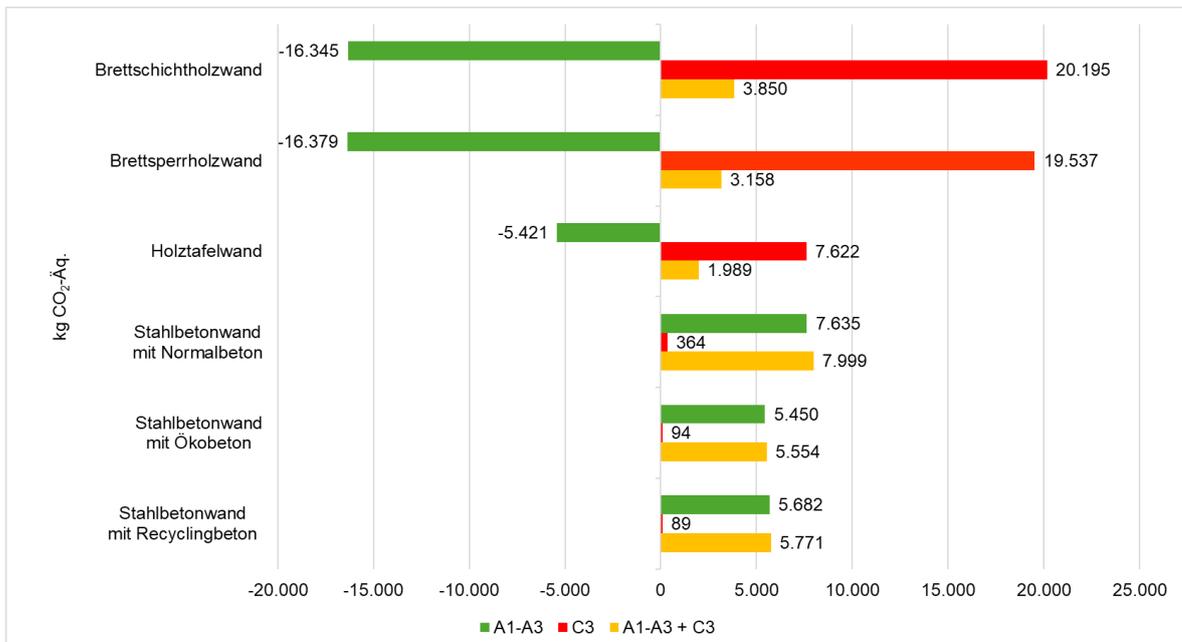


Abbildung 36 GWP-Gegenüberstellung der Wandvarianten⁹⁶

⁹⁶ Eigene Darstellung.

5.4.2 Decken

Aus der GWP-Berechnung der Deckenvarianten werden folgende Ergebnisse erkenntlich (vgl. Abbildung 37).

1. Bei der Brettschichtholzdecke werden **17.015 kg CO₂** in der Herstellungsphase gespeichert und **21.023 kg CO₂** in der Abfallbehandlung ausgestoßen. Insgesamt werden für die Lebenszyklusphasen A1–A3 + C3 **4.008 kg CO₂** freigesetzt.
2. Die Brettsperrholzdecke verfügt in der Herstellungsphase mit **20.461 kg CO₂** über die **höchste** CO₂-Speichermenge, emittiert aber gleichzeitig in der Abfallbehandlung mit **24.406 kg CO₂** das meiste CO₂. In Summe werden über alle Lebenszyklusphasen **3.945 kg CO₂** freigesetzt.
3. Mit **1.033 kg CO₂** weist die Lignaturdecke in den Lebenszyklusphasen A1–A3 + C3 die beste CO₂-Bilanz auf. In den Phasen A1–A3 werden **8.436 kg CO₂** gebunden und in der Phase C3 werden **9.569 kg CO₂** freigesetzt.
4. Die Stahlbetonflachdecke mit **Normalbeton** wirkt sich anders als die Holzwände in der Herstellungsphase negativ auf die Umwelt aus und emittiert **9.187 kg CO₂**, während in der Abfallbehandlung **531 kg CO₂** und kombiniert **11.830 kg CO₂** freigesetzt werden.
5. Durch den Einsatz von **Ökobeton** verringert sich das GWP in der Herstellungsphase um **1.072 kg CO₂** bzw. um **12 %** gegenüber der Stahlbetonvariante mit Normalbeton. Insgesamt werden kombiniert über alle Lebenszyklusphasen durch den Einsatz von Ökobeton **3.577 kg** weniger **CO₂** freigesetzt.
6. Der Einsatz von **Recyclingbeton** induziert am Ende der betrachteten Lebenszyklusphasen wiederum **8.584 kg CO₂** und entspricht einer CO₂-Einsparung von **3.246 kg CO₂** gegenüber Normalbeton. In der CO₂-Bilanz emittiert Ökobeton demnach geringere Mengen als Recyclingbeton.
7. Die Spannbeton-Fertigdecke stößt über alle Lebenszyklusphasen hinweg **5.717 kg CO₂**. In der Herstellungsphase werden **5.641 kg CO₂** emittiert. Die Emissionen in der Abfallbehandlung verhalten sich gering und bleiben bei **76 kg CO₂**.

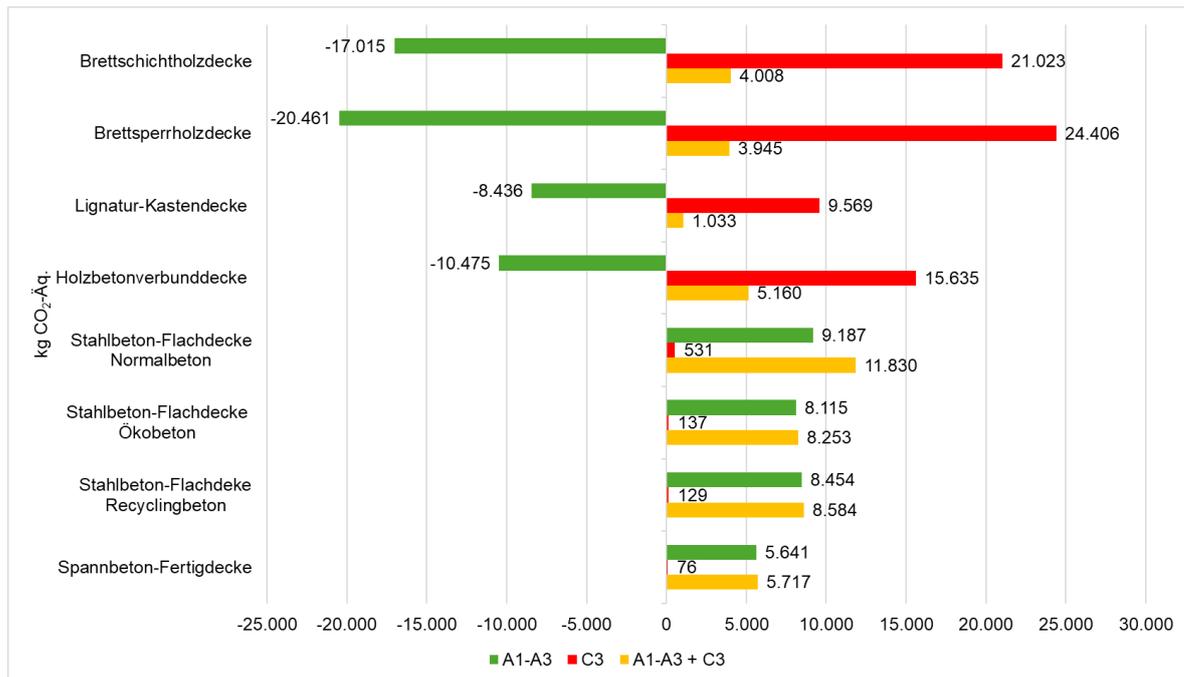


Abbildung 37 GWP-Gegenüberstellung der Deckenvarianten⁹⁷

5.5 Gewichtsvergleich

5.5.1 Wände

Da Bestandsgebäude eine begrenzte Kapazität an Lastreserven aufweisen, bildet bei der Wahl der Aufstockungsvariante das Gewicht ein maßgebliches Kriterium. Für Abbildung 38 wurde das Gewicht der jeweiligen Wandvarianten basierend auf der Mengenermittlung in Abschnitt 5.3.2 berechnet. Alle Wände haben dieselbe Bauteildicke von **20 cm**.

- Mit circa **4,63 Tonnen** trifft die Wahl der leichtesten Aufstockungsvariante auf die Holztafelwände. Im Vergleich zu Stahlbetonwänden können hier **92,14 %** bzw. **54,22 Tonnen** an Aufstockungsgewicht eingespart werden. Das leichte Gewicht kann für die Belastung der bestehenden Tragkonstruktion von Vorteil sein.
- Die Brettsperrholzwand mit circa **11,97 Tonnen** und die Brettschichtholzwand mit **12,40 Tonnen** weisen nahezu das gleiche Gewicht auf. Aufgrund der höheren Holzmenge wiegen beide Varianten **zwischen 61 und 63 %** mehr als die Holztafelwände.

⁹⁷ Eigene Darstellung.

- Die Stahlbetonwände mit Normalbeton, Ökobeton und Recyclingbeton wiegen mit circa **58,85** und **58,51** bzw. **58,07** Tonnen nahezu identisch viel und gelten als eine deutlich höhere Belastung für die bestehende Tragkonstruktion als Holzbauvarianten.

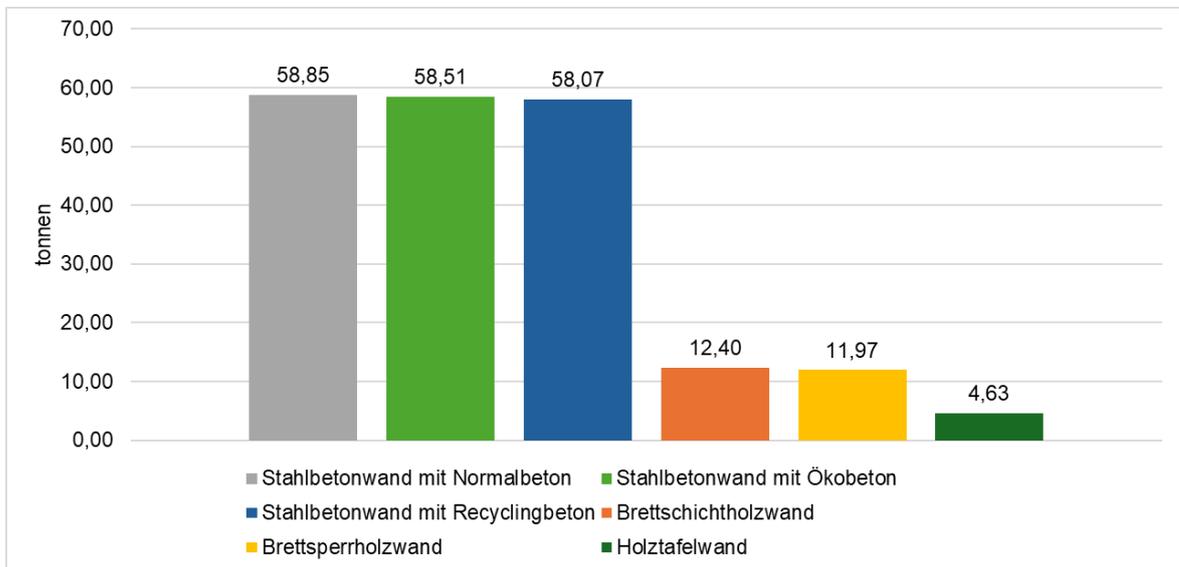


Abbildung 38 Gewichtsvergleich der Wandvarianten⁹⁸

5.5.2 Decken

Analog zu den Wänden wurden auch für die Decken Massen ermittelt. Das Ziel bildete es auch hier, die leichteste Aufstockungsvariante zu identifizieren. Es ist zu berücksichtigen, dass die Deckenvarianten unterschiedliche Deckenstärken aufweisen, die in Kapitel 4 im Rahmen einer Entwurfsstatik festgelegt wurden.

- Die Lignaturdecke hat mit circa **5,72 Tonnen** das geringste Gewicht. Gegenüber Stahlflachdecken können mit ihr circa 93 % bzw. **81 Tonnen** an Aufstockungsgewicht gespart werden.
- Die Brettsperrholzwand mit **12,91 Tonnen** und die Brettschichtholzwan mit **14,95 Tonnen** weisen ebenso ein geringes Auflastungsgewicht auf. Aufgrund der höheren Holzmenge wiegen beide Varianten **zwischen 55 und 62 %** mehr als die Lignaturdecke.
- Die Holzbetonverbunddecke erweist sich mit **34,98 Tonnen** als Mittelweg zwischen Holzbau- und Massivdecken.

⁹⁸ Eigene Darstellung.

- Die Spannbeton-Fertigteildecke wiegt mit **43 Tonnen** circa halb so viel wie die Stahlbetonflachdecken. Dadurch kann leichter und materialeffizienter mit mineralischen Baustoffen gebaut werden.
- Die Stahlbeton-Flachdecken mit Normalbeton, Ökobeton und Recyclingbeton wiegen mit circa **86,66** und **86,17** bzw. **85,52** Tonnen nahezu identisch viel und gelten als eine deutlich höhere Belastung der bestehenden Tragkonstruktion als Holzbauvarianten (vgl. Abbildung 39).

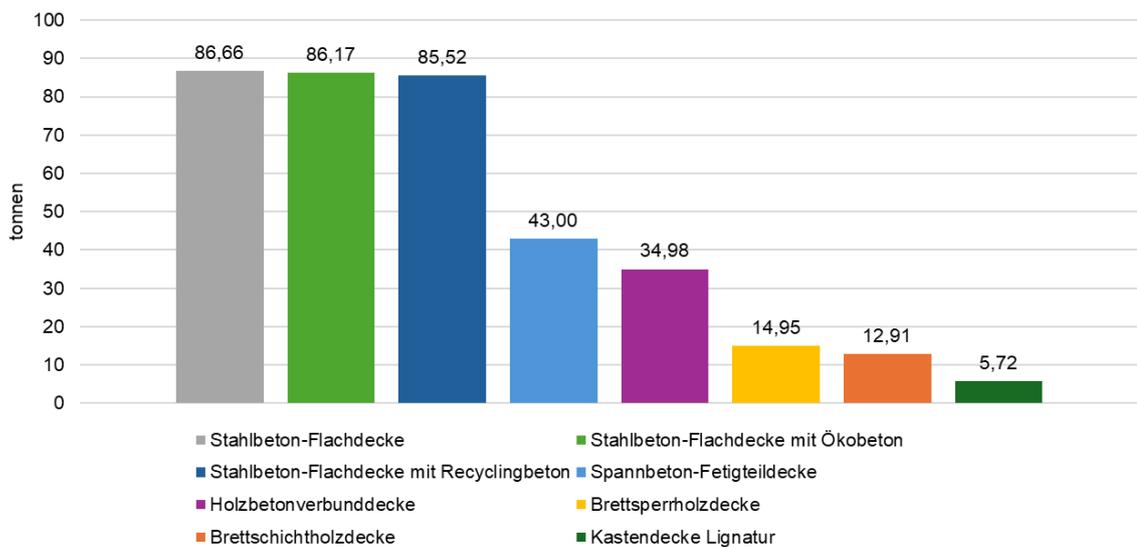


Abbildung 39 Gewichtsvergleich der Deckenvarianten⁹⁹

⁹⁹ Eigene Darstellung.

6 Wirtschaftlichkeit und CO₂-Bepreisung

6.1 Materialkostenermittlung der Aufstockungsvarianten

6.1.1 Berechnungsmodell

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Aufstockungsvarianten wird nach dem Berechnungsschema in Abbildung 40 vorgegangen. Die **Materialkosten** in Tabelle 15 werden mit den in Abschnitt 5.3.2 ermittelten **Mengen multipliziert** und bei mehreren Komponenten **addiert**. Es werden lediglich Preise für die reinen Materialkosten kalkuliert. Kosten für den Transport und die Montage werden in dieser Wirtschaftlichkeitsberechnung **nicht** berücksichtigt.

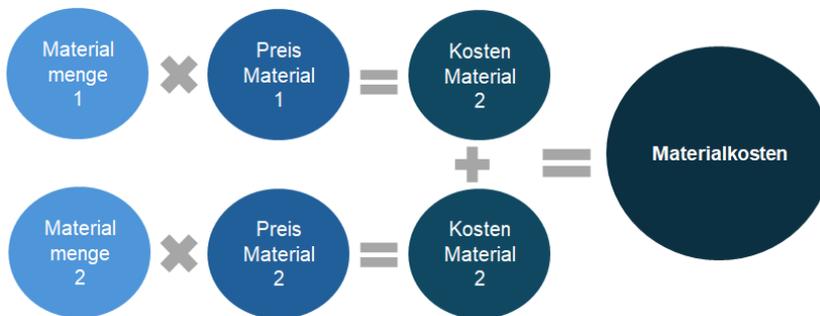


Abbildung 40 Berechnungsmodell der Materialkosten¹⁰⁰

6.1.2 Materialkostenübersicht

Die **Einheitspreise** basieren auf Preisauskünften der Amann Holzbau GmbH, DW-Systembau GmbH sowie auf im Internet deklarierten Herstellerpreisen¹⁰¹ und auf als Literaturquellen dienenden Baupreisbüchern.¹⁰² In Anhang 8 und 9 befinden sich die Herstellerpreisanfragen (vgl. Tabelle 15).

Material	Preis €/m ²	Preis €/m ³	Preis €/to	Quelle
KVH für 16 cm Ständerwerk	70			Amann Holzbau GmbH
OSB 3 für 2 x 25 mm	34			Amann Holzbau GmbH
Brettspertholz Wandelement (20cm)	130			Amann Holzbau GmbH
Brettspertholz Deckenelement (24cm)	180			Amann Holzbau GmbH
Brettschichtholz Wandelement (20cm)	115			Amann Holzbau GmbH
Brettschichtholz Deckenelement (20cm)	115			Amann Holzbau GmbH
Lignatur Flächenelement (24 cm)	180			Amann Holzbau GmbH
Brettstapelholzdecke aus KVH (15 cm)	130			Amann Holzbau GmbH
Aufbeton C50/60 (8 cm schicht)		151,5		Holcim Kies & Beton GmbH
Betonstahlmatten Q524 A			1.400	Baupreise für Hoch- und Objektbau 2023
Betonstabstahl			1.400	Baupreise für Hoch- und Objektbau 2023
Beton C30/37		141		Holcim Kies & Beton GmbH
Beton C30/37 Holcim EcoPact		165,5		Holcim Kies & Beton GmbH
Spannbeton Fertigteildecke	45			DW Systembau GmbH

Tabelle 15 Einheitspreise der Materialien¹⁰³

¹⁰⁰ Eigene Darstellung.

¹⁰¹ Vgl. Holcim: HOLCIM PREISLISTE 2023, 2023b, (URL 18) (13.12.2024, 16:16).

¹⁰² Vgl. Morell, Uwe: Baupreise für Hoch- und Objektbau 2023, Köln, 2023, S. 79–85.

¹⁰³ Eigene Darstellung.

6.1.3 Holzbauwände

6.1.3.1 Holztafelwand

Die Gesamtkosten der Aufstockungsvariante mit Holztafelwänden belaufen sich auf **12.179 €** für eine Wandfläche von 122,30 m², abzüglich Fenster- und Türaussparungen. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **99,90 €/m²** (vgl. Abbildung 41).

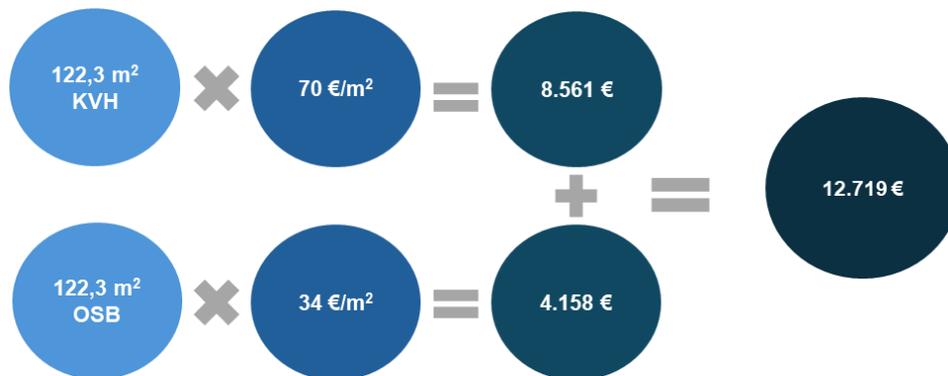


Abbildung 41 Gesamtkosten der Materialien¹⁰⁴

6.1.3.2 Brettsperrholzwand

Für die Brettsperrholzwand wurden bei einem Einheitspreis von **130 €/m²** für die Wandfläche des gesamten Aufstockungsbereichs Materialkosten in Höhe von **15.899 €** ermittelt. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **124,87 €/m²** (vgl. Abbildung 42).



Abbildung 42 Gesamtkosten der Materialien¹⁰⁵

¹⁰⁴ Eigene Darstellung.

¹⁰⁵ Eigene Darstellung.

6.1.3.3 Brettschichtholz wand

Der Einheitspreis der Brettsperrholzdecke wurde für eine Wandstärke von **20 cm** mit **115 €/m²** kalkuliert. In Summe belaufen sich die Kosten für die Aufstockungsvariante mit Brettschichtholzwänden auf **14.064 €**. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² bedeutet das **110,46 €/m²** (vgl. Abbildung 43).



Abbildung 43 Gesamtkosten der Materialien¹⁰⁶

6.1.4 Holzbaudecken

6.1.4.1 Brettsperrholzdecke

Bei der Variante der Brettsperrholzdecke mit einer Deckenstärke von 24 cm beträgt der Einheitspreis **180 €/m²**. Der Einheitspreis wird mit einer Deckenfläche von 127,32 m² verrechnet und ergibt in Summe Materialkosten von **22.917 €**. Für die BGF von 127,32 m² entspricht das **180,00 €/m²** (vgl. Abbildung 44).



Abbildung 44 Gesamtkosten der Materialien¹⁰⁷

¹⁰⁶ Eigene Darstellung.

¹⁰⁷ Eigene Darstellung.

6.1.4.2 Brettschichtholzdecke

Die Brettschichtholzdecke mit **20 cm Deckenstärke** kostet mit 115 €/m² in Summe 14.641 €. Bei einer BGF von 127,32 m² entspricht das **114,99 €/m²** (vgl. Abbildung 45).



Abbildung 45 Gesamtkosten der Materialien¹⁰⁸

6.1.4.3 Lignatur-Kastendecke

Für die Materialkosten der Lignaturdecke wurde ein Einheitspreis von **180 €/m²** ermittelt und mit der gesamten Deckenfläche von 127,32 m² verrechnet. Daraus ergeben sich Materialkosten in Höhe von **22.917 €**. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **180,00 €/m²** (vgl. Abbildung 46).



Abbildung 46 Gesamtkosten der Materialien¹⁰⁹

6.1.4.4 Holzbetonverbunddecke

Die Materialkosten der Holzbetonverbunddecke gelten für eine Brettstapelholzdecke mit **15 cm Deckenstärke** und einer **8-cm-Aufbetonschicht**. Dies kostet in Summe für 127,32 m² Deckenfläche **19.495 €**. Der Einheitspreis von **130 €/m²** für **Konstruktionsvollholz** ergibt sich aus der Deckenstärke der Brettstapelholzdecke mit 0,15 m und dem Einheitspreis von 873,10 €/m³. Für die Aufbetonschicht der Festigkeitsklasse C50/60 wurde ein Einheitspreis von

¹⁰⁸ Eigene Darstellung.

¹⁰⁹ Eigene Darstellung.

151,50 €/m³ ermittelt, was in Summe 1.543 € ergibt, während die Kosten für die Bewehrung 1.401 € betragen. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das 153,12 €/m² (vgl. Abbildung 47).

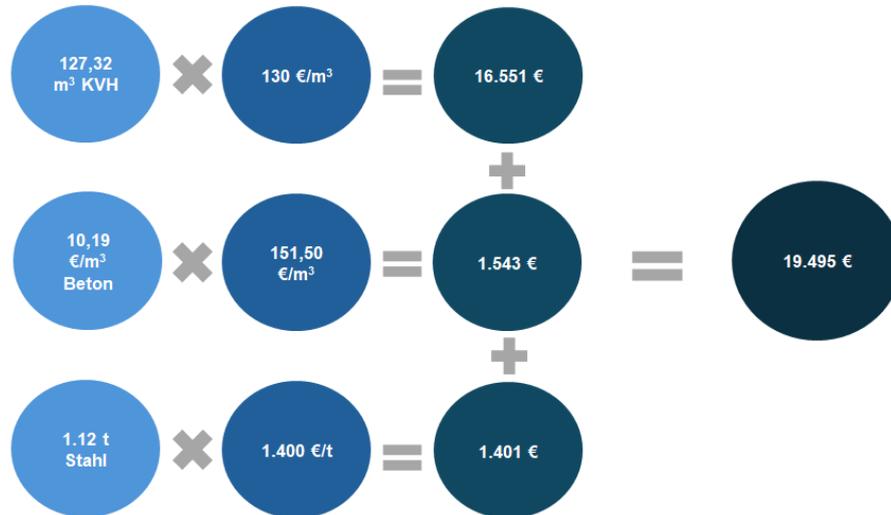


Abbildung 47 Gesamtkosten der Materialien¹¹⁰

6.1.5 Massivwände

6.1.5.1 Stahlbetonwand mit Normalbeton

Für die Stahlbetonwände mit einem **Normalbeton** der Druckfestigkeitsklasse **C30/37** und Betonstahlmatten als flächige Wandbewehrung beträgt die Materialkostensumme **6.878 €**. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **54,02 €/m²** (vgl. Abbildung 48).

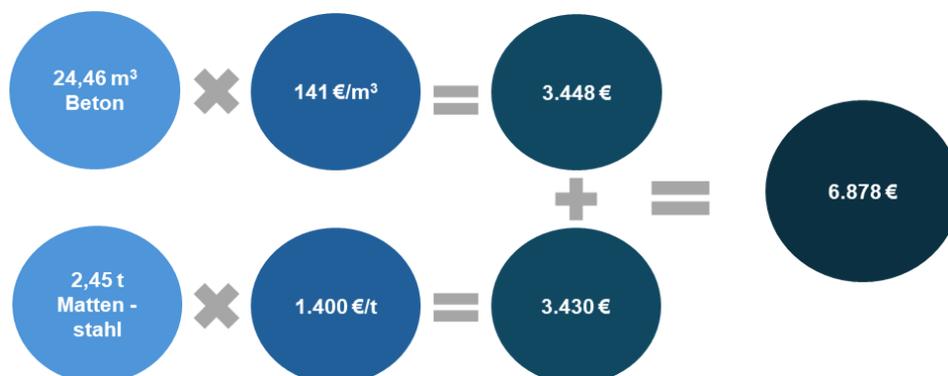


Abbildung 48 Gesamtkosten der Materialien¹¹¹

¹¹⁰ Eigene Darstellung.

¹¹¹ Eigene Darstellung.

6.1.5.2 Stahlbetonwand mit Ökobeton

Die Ausführung der Stahlbetonwände mit **20 cm** Bauteildicke wird in Abbildung 49 unter Verwendung von Holcim-EcoPact Beton bzw. **Ökobeton** der Druckfestigkeitsklasse **C30/37** berechnet. Die Stahlmenge ist hier identisch. In Summe belaufen sich die Kosten auf **7.478 €**, womit sie die Kosten der Stahlbetonwand mit Normalbeton um circa **600,00 €** übersteigen. Für die BGF von 127,32 m² entspricht das **58,73 €/m²**.

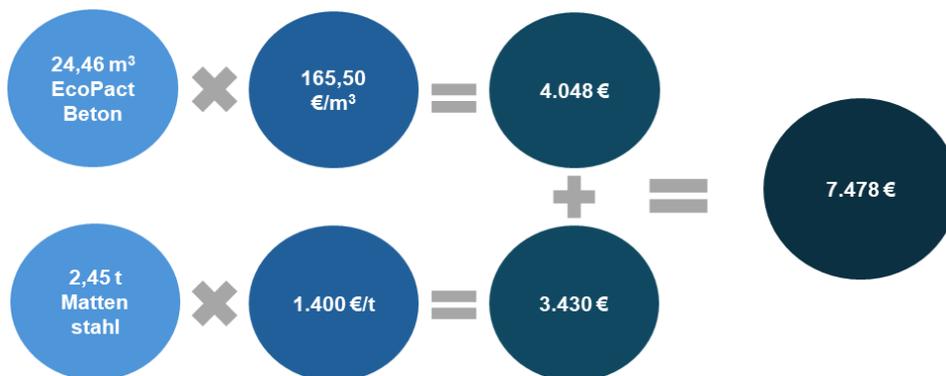


Abbildung 49 Gesamtkosten der Materialien¹¹²

6.1.6 Massivdecken

6.1.6.1 Stahlbetondecke mit Normalbeton

Für die Stahlbetonflachdecke mit **28 cm** Deckenstärke wurden Materialkosten in Höhe von **11.270 €** ermittelt. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **88,52 €/m²** (vgl. Abbildung 50).

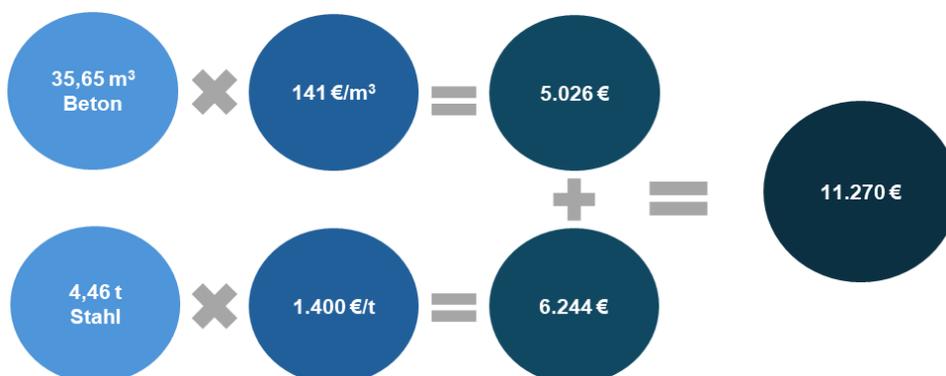


Abbildung 50 Gesamtkosten der Materialien¹¹³

¹¹² Eigene Darstellung.

¹¹³ Eigene Darstellung.

6.1.6.2 Stahlbeton-Flachdecke mit Ökobeton

Analog zu den Stahlbetonwänden wird auch bei der Stahlbetonflachdecke die Verwendung von **Ökobeton** der Festigkeitsklasse **C30/37** in Betracht gezogen. In Summe betragen die Materialkosten der Stahlbetonflachdecke mit einer Gesamtdeckenstärke von **28 cm** circa **12.144 €**. Bezogen auf die BGF von 127,32 m² entspricht das **95,38 €/m²** (vgl. Abbildung 51).

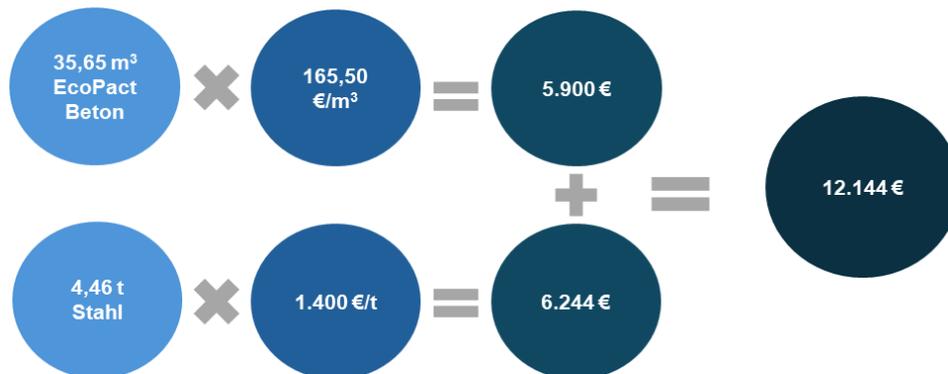


Abbildung 51 Gesamtkosten der Materialien¹¹⁴

6.1.6.3 Spannbeton-Fertigteildecke

Für die **20 cm** dicke Spannbetondecke (als Fertigteildecke ausgeführt), die sich als materialeffiziente Ausführungsvariante eignet, wurde ein Einheitspreis von **45 €/m²** ermittelt. Die Materialkosten für die Spannbetondecke und den Beton C20/25 für die Vergussfugen wurden auf **5.842 €** berechnet. Für die BGF von 127,32 m² entspricht das **45,88 €/m²** (vgl. Abbildung 52).



Abbildung 52 Gesamtkosten der Materialien¹¹⁵

¹¹⁴ Eigene Darstellung.

¹¹⁵ Eigene Darstellung.

6.2 CO₂-Bepreisung und Gesamtkosten

Das **CO₂-Schattenpreismodell** dient als Anreiz für die Bauwirtschaftenden, künftig bei der Planung von Bauvorhaben durch die Einkalkulierung von Umweltfolgekosten weniger auf klimaschädliche Baustoffe und Baumaßnahmen zurückzugreifen. Der CO₂-Schattenpreis ist ein **fiktiver Preis**, der für jede entstehende Tonne an CO₂ bei Baumaßnahmen veranschlagt wird. Die wirtschaftlichen Vorteile von klimaschädlichen Produkten sollen durch den CO₂-Preisauflage auf das Preisniveau von klimaschonenden Produkten gebracht werden.¹¹⁶ Das Umweltbundesamt errechnet diesen fiktiven Preis und empfiehlt derzeit einen CO₂-Preisauflage von **300 €/t CO₂**.¹¹⁷ Die ausgestoßenen CO₂-Emissionen je entstehender Tonne werden mit dem vom Umweltbundesamt empfohlenen Schattenpreis verrechnet. Je mehr CO₂ ausgestoßen wird, desto höher liegt somit der fiktive CO₂-Schattenpreis. Für die Ermittlung der Gesamtkosten wird die Summe aus CO₂-Kosten und Materialkosten gebildet.

Für die nachfolgende Berechnung werden ebenso wie für die Materialkosten auch die CO₂-Emissionen der betrachteten Lebenszyklusphasen **A1–A3 + C3** auf die BGF von 127,32 m² bezogen. In Abbildung 53 wird das Berechnungsschema für diesen Vorgang visualisiert.

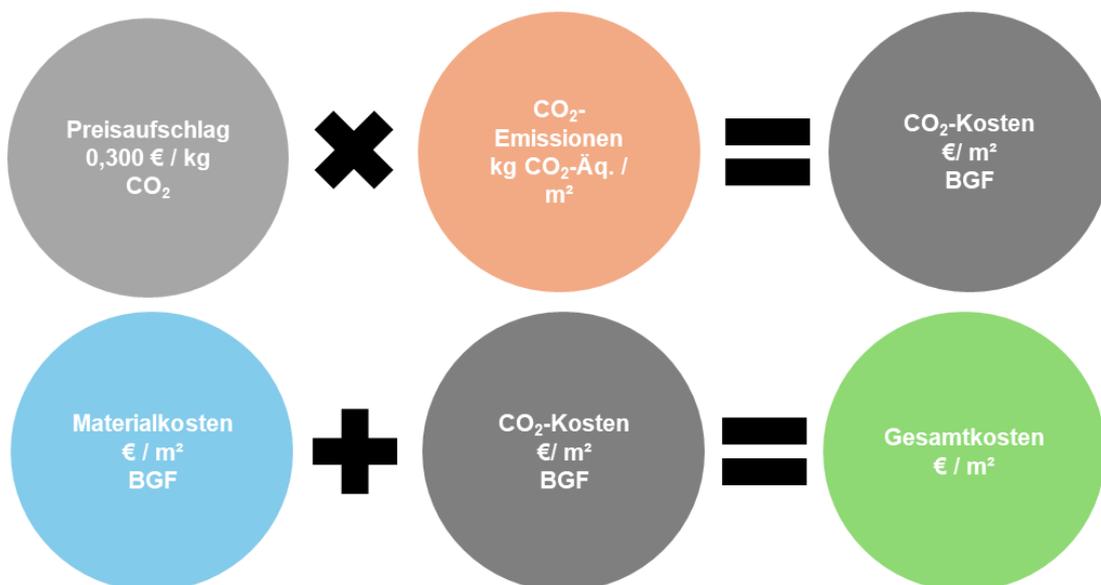


Abbildung 53 CO₂-Schattenpreismodell und Gesamtkosten¹¹⁸

¹¹⁶ Vgl. Kapellmann: Erstes Bundesland führt CO₂-Schattenpreis ein, 02.08.2023, (URL 19) (14.12.2024, 12:15).

¹¹⁷ Vgl. Wilke, Sibylle: Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen, 26.11.2024-b, (URL 20) (14.12.2024, 11:49).

¹¹⁸ Eigene Darstellung.

6.2.1 Wandvarianten

Der CO₂-Preiszuschlag von **0,30 €/kg CO₂** wird mit den CO₂-Emissionen, die in Tabelle 16 auf die Brutto-Grundfläche von **127,32 m²** bezogen werden, verrechnet. Daraus ergeben sich die CO₂-Kosten pro m² Brutto-Grundfläche. Für diese Kalkulation wurden die in Kapitel 5 berechneten GWP-Werte nach den Lebenszyklusphasen **A1–A3 + C3** durch die Brutto-Grundfläche von 127,32 m² dividiert. Die **Materialkosten pro m² BGF** wurden danach mit den **CO₂-Kosten pro m² BGF multipliziert**. Es ist erkennbar, dass die Wandvarianten in Stahlbeton einen höheren Preiszuschlag aufweisen als die Holzbauvarianten. In der Gesamtkostenberechnung fällt dennoch die Ausführung der Wände in Stahlbeton pro m² kostengünstiger aus. In Anhang 10 befindet sich die Berechnung der GWP-Werte bezogen auf die Bruttogrundfläche.

Varianten - Wände	A1-A3 + C3 kg CO ₂ -Äq./m ²	CO ₂ -Preiszuschlag € / kg CO ₂	CO ₂ -Kosten €/m ² BGF
Holztafelwand	17,29	0,30	5,19
Brettsperrholzwand	24,80	0,30	7,44
Brettschichtholzwand	30,24	0,30	9,07
Stahlbetonwand mit Normalbeton	62,83	0,30	18,85
Stahlbetonwand mit Ökobeton	43,62	0,30	13,09
Varianten - Wände	Materialkosten €/m ² BGF	CO ₂ -Kosten €/m ² BGF	Gesamtkosten €/m ²
Holztafelwand	99,90	5,19	105,08
Brettsperrholzwand	124,87	7,44	132,32
Brettschichtholzwand	110,46	9,07	119,53
Stahlbetonwand mit Normalbeton	54,02	18,85	72,87
Stahlbetonwand mit Ökobeton	58,73	13,09	71,82

Tabelle 16 CO₂-Bepreisung und Gesamtkosten der Wände¹¹⁹

6.2.2 Deckenvarianten

Die CO₂-Bepreisung zeigt auch bei den Decken, dass der höchste CO₂-Preiszuschlag mit **27,87 €/m²** bei der **Stahlbetonvariante mit Normalbeton** anfällt. Auch in dieser Betrachtung ist erkennbar, dass die Deckenvarianten aus Stahlbeton einen höheren Preiszuschlag bedeuten als die Holzbauvarianten. Dies liegt an den höheren CO₂-Emissionen. In der Gesamtkostenberechnung fällt dennoch die Ausführung der Decken in Stahlbeton auf den m² gerechnet

¹¹⁹ Eigene Darstellung.

kostengünstiger aus (vgl. Tabelle 17). In Anhang 11 befindet sich die Berechnung der GWP-Werte bezogen auf die Bruttogrundfläche.

Varianten - Decken	A1-A3 + C3 kg CO ₂ -Äq./m ²	CO ₂ -Preiszuschlag € / kg CO ₂	CO ₂ -Kosten €/m ² BGF
Brettspertholzdecke	31,48	0,30	9,44
Brettschichtholzdecke	30,98	0,30	9,30
Lignaturdecke	8,11	0,30	2,43
Holzbetonverbunddecke	40,53	0,30	12,16
Stahlbetonflachdecke mit Normalbeton	92,92	0,30	27,87
Stahlbetonflachdecke mit Ökobeton	64,82	0,30	19,45
Spannbetonfertigdecke	44,90	0,30	13,47

Varianten - Decken	Materialkosten €/m ² BGF	CO ₂ -Kosten €/m ² BGF	Gesamtkosten €/m ²
Brettspertholzdecke	180,00	9,44	189,44
Brettschichtholzdecke	114,99	9,30	124,29
Lignaturdecke	180,00	2,43	182,43
Holzbetonverbunddecke	153,12	12,16	165,28
Stahlbetonflachdecke mit Normalbeton	88,52	27,87	116,39
Stahlbetonflachdecke mit Ökobeton	95,38	19,45	114,83
Spannbetonfertigdecke	45,88	13,47	59,36

Tabelle 17 CO₂-Bepreisung und Gesamtkosten der Decken¹²⁰

6.3 Gesamtkostenübersicht

6.3.1 Wandvarianten

Die nachfolgende Abbildung bezieht sich auf den Einfluss der CO₂-Bepreisung auf die in Unterkapitel 6.1 berechneten Materialkosten. Die **Differenzbeträge** der Stahlbetonvarianten fallen höher aus als bei den Holzbauvarianten. Die Stahlbetonwand erfährt durch die CO₂-Bepreisung eine **Erhöhung** der Materialkosten um circa **25,5 %**. Bei der Ausführungsvariante mit **Ökobeton** beschränkt sich der **Zuwachs** der Materialkosten auf circa **18,3 %**. Diese Zunahme liegt an den höheren Beschaffungskosten der Ökobetonvariante. Die Wandvarianten im Holzbau weisen geringere Differenzbeträge auf, sodass die **Holztafelwand** im Vergleich zu den **Stahlbetonvarianten** nur circa **5 % teurer** ausfällt. Die Differenzbeträge der Brettschichtholz wand und der Brettspertholz wand verhalten sich ähnlich und machen einen Preisunterschied von 7,6 % bzw. 5,7 % aus. Im Ergebnis der Berechnungen ergeben die kosteneffizientere Art des Bauens klimaschädliche Bauprodukte wie Stahlbetonwände. Zusammenfassend lieferte die

¹²⁰ Eigene Darstellung.

Berechnung die Erkenntnis, dass die Umstellung auf klimafreundlichere Bauprodukte beim aktuellen CO₂-Schattenpreis von 300 €/t **nicht** erreicht werden kann und eine **Anpassung erforderlich** ist. Eine Erhöhung des Schattenpreises kann allerdings zu höheren Materialgesamtkosten führen (vgl. Abbildung 54).

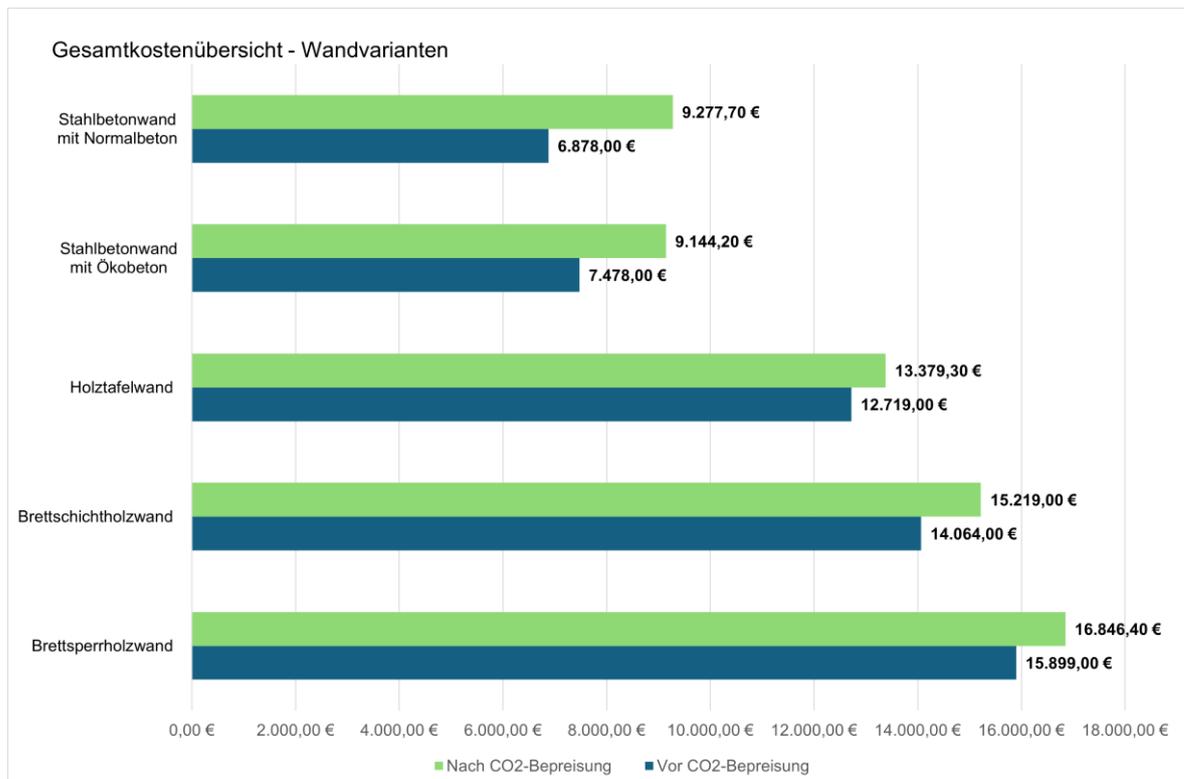


Abbildung 54 Gesamtkostenübersicht der Wände¹²¹

¹²¹ Eigene Darstellung.

6.3.2 Deckenvarianten

Die Differenzbeträge der Stahlbetonvarianten fallen auch hier höher aus als bei den Holzbauvarianten. Die **Spannbeton-Fertigdecke** bildet die wirtschaftlichste Deckenvariante. Vor der CO₂-Bepreisung liegen die Kosten bei **5.842 €**, nach dieser steigen sie auf **7.557 €**. Den geringsten Preisaufschlag weist die Lignaturdecke mit lediglich 660,30 € auf. Die **höchsten** Investitionskosten liegen bei der Brettsperrholzdecke mit 22.917 € vor – nach der CO₂-Bepreisung mit **24.119 €**. Im mittleren Spektrum befindet sich die Brettschichtholzdecke, die nach der CO₂-Bepreisung als einzige Holzbaudecke eine nahezu kostengleiche Alternative zu den Stahlbetonvarianten darstellt. Das Synergieprodukt der Holzbetonverbunddecke befindet sich im höheren Preissegment, aber bewegt sich dennoch unterhalb der Brettsperrholz- und Lignaturdecke. Die Gesamtkostenübersicht der Deckenvarianten deutet auf eine ähnliche Entwicklung hin und bestärkt die Erkenntnisse sowie die Rückschlüsse aus der ersten Berechnung für die Wandvarianten (vgl. Abbildung 55).

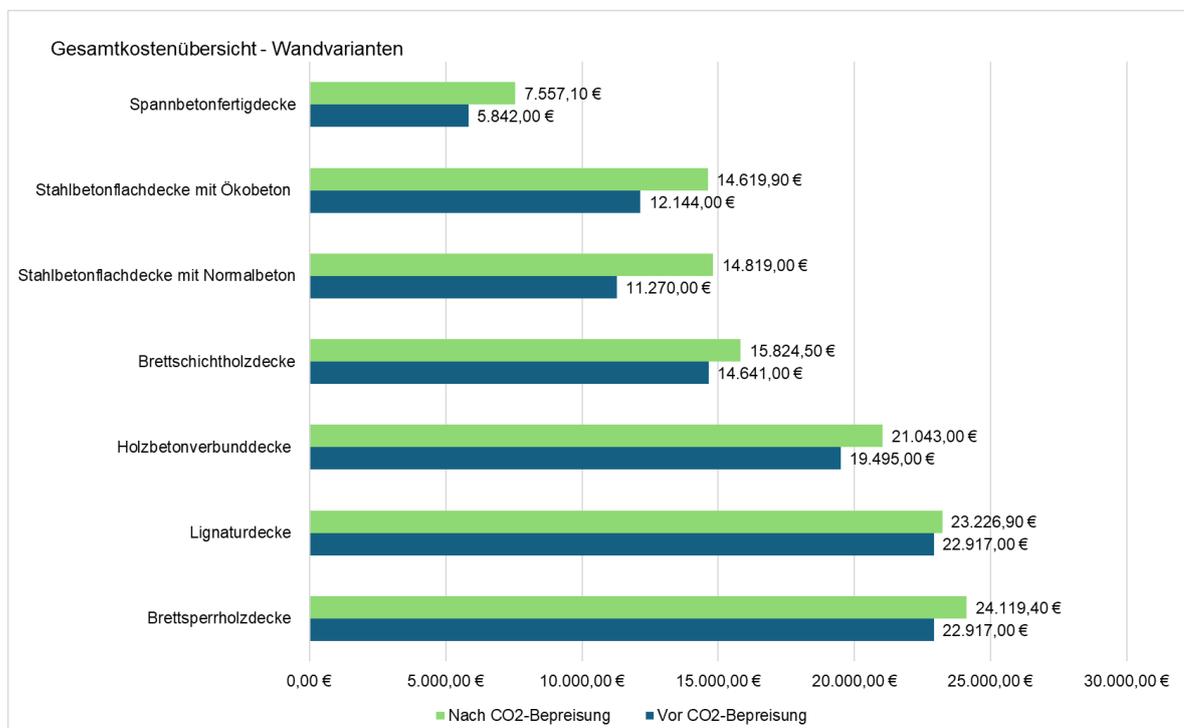


Abbildung 55 Gesamtkostenübersicht der Decken¹²²

¹²² Eigene Darstellung.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Diese Forschungsarbeit befasste sich mit der Frage ‚Kann eine Aufstockung in der Holzbauweise die Lösung für eine nachhaltige Nachverdichtung bilden?‘. Um ein aussagekräftiges Fazit abzuleiten, wird im Vorfeld eine Gegenüberstellung der Untersuchungen geboten, die in dieser Arbeit stattgefunden haben. Im auf die Klimateffizienz, die Wirtschaftlichkeit und die Massen bezogenen Vergleich sollen insbesondere die Aufstockungspotenziale der Holzbauvariante, aber auch die der konventionellen Bauweise identifiziert werden. Dafür wurde zunächst eine **Bewertungsmatrix** entworfen, um die Aufstockungsvarianten in den genannten Untersuchungspunkten zu bewerten. Dafür wurde eine Gewichtung vorgenommen. Das **GWP** über alle in dieser betrachteten Lebenszyklusphasen (**A1–A3 + C3**) erhielt die Gewichtung von **40 %**. Ebenso wurde für die **Wirtschaftlichkeit** eine Gewichtung von **40 %** festgelegt und dem **Gewicht** wurden **20 %** zugewiesen. Die Wirtschaftlichkeit stellte bislang das die Entscheidungsfindung von Bauherren dominierende Kriterium dar. Dennoch wird in dieser Bewertung das GWP gleichrangig zur Wirtschaftlichkeit gewichtet, um eine hohe Vergleichbarkeit zu erzielen. In Tabelle 18 und 19 wird das Punktesystem der drei Kriterien als Bewertungsgrundlage dargestellt. Die **Punkteskala** bezieht sich auf den Bereich von **0–10** und wurde einmal für die Ergebnisse der Wandvarianten sowie einmal für die Ergebnisse zu den Deckenvarianten angelegt.

GWP Wände		Preis Wände		Gewicht Wände	
kg CO ₂ -Äq.	Punkte	€	Punkte	t	Punkte
bis 2000	10	bis 6000	10	bis 5	10
bis 2500	9	bis 7000	9	bis 11	9
bis 3000	8	bis 8000	8	bis 17	8
bis 3500	7	bis 9000	7	bis 23	7
bis 4000	6	bis 10000	6	bis 29	6
bis 4500	5	bis 11000	5	bis 35	5
bis 5000	4	bis 12000	4	bis 41	4
bis 5500	3	bis 13000	3	bis 47	3
bis 6000	2	bis 14000	2	bis 53	2
bis 6500	1	bis 15000	1	bis 59	1
bis 7000	0	bis 16000	0	bis 65	0

Tabelle 18 Punktesystem der Wände¹²³

¹²³ Eigene Darstellung.

GWP Decke		Preis Decke		Gewicht Decke	
kg CO ₂ -Äq.	Punkte	€	Punkte	t	Punkte
bis 2000	10	bis 5000	10	bis 5	10
bis 3000	9	bis 7000	9	bis 13	9
bis 4000	8	bis 9000	8	bis 21	8
bis 5000	7	bis 11000	7	bis 29	7
bis 6000	6	bis 13000	6	bis 37	6
bis 7000	5	bis 15000	5	bis 45	5
bis 8000	4	bis 17000	4	bis 53	4
bis 9000	3	bis 19000	3	bis 61	3
bis 10000	2	bis 21000	2	bis 69	2
bis 11000	1	bis 23000	1	bis 77	1
bis 12000	0	bis 25000	0	bis 85	0

Tabelle 19 Punktesystem der Decken¹²⁴

Die Bewertungsmatrix wurde in die Kategorien GWP mit **40 %**, Preis mit **40 %** und Gewicht mit **20 %** Gewichtung eingeteilt. Jede Variante wurde nach der Punkteskala bepunktet und gewichtet. Die Punkte wurden mit der jeweiligen Gewichtung der einzelnen Kategorien multipliziert und am Ende addiert, sodass im Anschluss daran die Varianten in eine Rangfolge gebracht werden konnten. In Abbildung 56 sind die Punktvergabe und die Auswertung bzw. das Ranking der einzelnen Aufstockungsvarianten in der Bewertungsmatrix zu sehen.

Gewichtung	GWP		Preis		Gewicht		Punkte	Ranking
	4	4	4	4	2	2		
	Punkte	Punkte x Gewichtung	Punkte	Punkte x Gewichtung	Punkte	Punkte x Gewichtung		
Wand								
Brettschichtholz	6	24	1	4	8	16	44	2
Brettsperrholz	7	28	0	0	8	16	44	2
Holztafel	10	40	3	12	10	20	72	1
Stahlbeton mit Normalbeton	0	0	9	36	1	2	38	4
Stahlbeton mit Ökobeton	2	8	8	32	1	2	42	3
Decke								
Brettschichtholz	7	28	5	20	9	18	66	2
Brettsperrholz	8	32	1	4	8	16	52	4
Holzbetonverbund	6	24	2	8	6	12	44	5
Lignatur	10	40	1	4	9	18	62	3
Spannbeton-Fertigteil	6	24	9	36	5	10	70	1
Stahlbeton mit Normalbeton	0	0	6	24	0	0	24	7
Stahlbeton mit Ökobeton	3	12	6	24	0	0	36	6

Abbildung 56 Bewertungsmatrix für die Aufstockungsvarianten¹²⁵

¹²⁴ Eigene Darstellung.

¹²⁵ Eigene Darstellung.

Die Bewertungsmatrix umfasst für die Wandvarianten folgende Ergebnisse:

- Die **kostengünstigste** Ausführung bildet die **Stahlbetonvariante mit Normalbeton**, dicht gefolgt von der Stahlbetonvariante mit **Ökobeton**, die preislich aufgrund der nachhaltigen Zusammensetzung in der Gewichtung um **vier Punkte schlechter** abschneidet. Die Stahlbetonvariante mit Normalbeton belastet nach allen betrachteten Lebenszyklusphasen die Umwelt am meisten und kann lediglich bei **Substituierung** des Normalbetons mit **Ökobeton acht Punkte** erreichen. In der Kategorie ‚Gewicht‘ wird das zu hohe Aufstockungsgewicht der Stahlbetonwände deutlich, weshalb das Kriterium für beide Varianten nur zwei Punkte erhielt. Im gesamten Ranking befinden sich die Stahlbetonvariante auf dem **vierten und letzten Platz** und die Variante mit Ökobeton auf **Platz drei**.
- Die unwirtschaftlichste Variante ist die **Brettsperrholzwand**, die sich aber in der GWP-Kategorie als zweitbeste Wahl erweist. Auch die Leichtigkeit gegenüber den Stahlbetonvarianten wird in der Bewertung durch einen Punktevorsprung von 14 Punkten deutlich. Im gesamten Ranking befindet sich die Brettsperrholzwand auf **Platz zwei**.
- Der **Brettschichtholzwand** teilt sich mit der Brettsperrholzwand **Platz zwei**. Den Grund dafür bilden die gegenüber der Brettsperrholzdecke schlechtere CO₂-Bilanz aber dafür geringeren Materialgesamtkosten. Bei beiden Varianten ist das Gewicht gleichwertig.
- Auf **Platz eins** befindet sich die **Holztafelwand**, die somit das ausgewogenste Ergebnis aller drei Kategorien aufweist. Als Grund gilt der über alle Lebenszyklusphasen niedrige Treibhausgasausstoß, der neben der holzbasierten Bauweise auf den geringen Materialeinsatz zurückzuführen ist. Die Holztafelwand bildet die kostengünstigste Holzbauvariante, aber liegt in der Punktebewertung deutlich unter den Stahlbetonvarianten.

Aus der Bewertungsmatrix für die Decken geht Folgendes hervor:

- Auf den letzten beiden Plätzen befinden sich auch hier die beiden **Stahlbetonvarianten**. Es ist auch hier erkenntlich, dass durch den Einsatz von Ökobeton statt Normalbeton der CO₂-Ausstoß reduziert werden kann. Beide Stahlbetonvarianten bedeuten gegenüber den anderen Varianten

eine deutlich höhere Tragwerksbelastung für das Bestandsgebäude und stellen daher ein geringeres Aufstockungspotenzial dar. Gegenüber den Holzbauvarianten liegt ein wirtschaftlicher Vorteil vor.

- Das Synergieprodukt der **Holzbetonverbunddecke** befindet sich auf **Platz fünf** und erreichte daher ein ausreichendes Resultat. In der CO₂-Bilanz erzielte die Holzbetonverbunddecke bessere Ergebnisse als die Stahlbetonvarianten, aber sie ist dennoch unwirtschaftlicher. Preislich befindet sich die Holzbetonverbunddecke mit **acht Punkten** im unteren Punktesegment.
- Die **Lignaturdecke** hat die **beste CO₂-Bilanz** und stellte sich als Gegenstück zur Holztafelwand heraus. Auch hier wird durch den geringen Materialeinsatz ein geringer Treibhausgasausstoß am Ende des Lebenszyklus erzielt. Zusammen mit der Brettsperrholzdecke ist die Lignaturdecke die unwirtschaftlichste Variante. Mit der Brettschichtholzdecke gleichgestellt hat die Lignaturdecke allerdings das **geringste Aufstockungsgewicht** der untersuchten Varianten.
- Ein überraschendes Ergebnis erzielte die **Spannbeton-Fertigteildecke** mit einem Ranking auf **Platz eins**. Ausschlaggebend war der gegenüber den anderen Aufstockungsvarianten dominierende wirtschaftliche Vorteil. In Relation zu den Stahlbetonflachdecken erzielte die Spannbetondecke in der CO₂-Bilanz dank ihrer effizienten Materialzusammensetzung ein besseres Ergebnis.

7.2 Ausblick

Die **Forschungsfrage** dieser Arbeit bezog sich darauf, das Potenzial von **Holzaufstockungen** auf einem Bürogebäude zu analysieren und konventionellen Bauweisen gegenüberzustellen. Das Ergebnis der erfolgten Untersuchungen besteht darin, dass die **ökologischen** und **ökonomischen Aspekte** bei der Bewertung in einem **Spannungsfeld** stehen. Die ökologische Bewertung bezieht sich in dieser Arbeit auf das globale Erwärmungspotenzial der Aufstockungsvarianten. Der Aspekt der **Ressourceneffizienz** wurde in dieser Arbeit nicht untersucht, spielt aber in der ökologischen Bewertung eine Rolle und könnte an anderer Stelle näher analysiert werden. Holzbasierte Aufstockungen könnten maßgeblich dazu beitragen, sich der angestrebten Treibhausgasneutralität zu nähern. **Stahlbeton** erweist sich als **klimaunfreundlichste** Variante und hat lediglich wirtschaftliche Vorteile, die als Argument für seine Nutzung bei einer Aufstockung dienen könnten. Durch den Einsatz von **nachhaltigem Beton** können die negativen Umweltauswirkungen **minimiert** werden.

Es wurde erkannt, dass der **Kohlenstoffbindungseffekt** besonders in der Herstellungsphase für eine Aufstockung mit Holz spricht. Aufgrund des gezielten Materialeinsatzes gelten beispielsweise **Holztafelwände** oder **Lignaturdecken** als vielversprechende Lösung für eine nachhaltige Nachverdichtung in urbanen Zentren. Diese Erkenntnis wird durch den Einsatz von **Spannbetondecken** verdeutlicht, die trotz ihrer mineralischen Basis überzeugende Ergebnisse liefern. Als Hybridlösung bietet die **Holzbetonverbunddecke** ökologische Vorteile ohne statisch und bauphysikalisch relevante Einbußen. Eine tiefgreifendere Analyse könnte das Potenzial dieser Hybridlösung verdeutlichen.

Eine erweiterte Untersuchung könnte dem Potenzial des **Stahlleichtbaus** für Aufstockungen gewidmet werden, da dieser ähnlich der Holzrahmenbauweise eine vorgefertigte bzw. emissionsarme Bauweise und ein geringes Aufstockungsgewicht ermöglicht. Aufgrund des begrenzten Untersuchungsrahmens wurde der Stahlleichtbau in dieser Arbeit nicht untersucht. Auch zu Aufstockungen mit vorgefertigten **Raummodulen** besteht weiterer Forschungsbedarf.

Dem Holzbau stehen des Weiteren **wirtschaftliche Herausforderungen** gegenüber, die selbst durch die in Unterkapitel 6.2 analysierte CO₂-Bepreisung auf Basis des aktuellen CO₂-Schattenpreises **nicht** vollständig ausgeglichen werden können. Seine Anhebung könnte dazu führen, dass neu abgewogen wird, mit Holz oder mit Stahlbeton zu bauen.

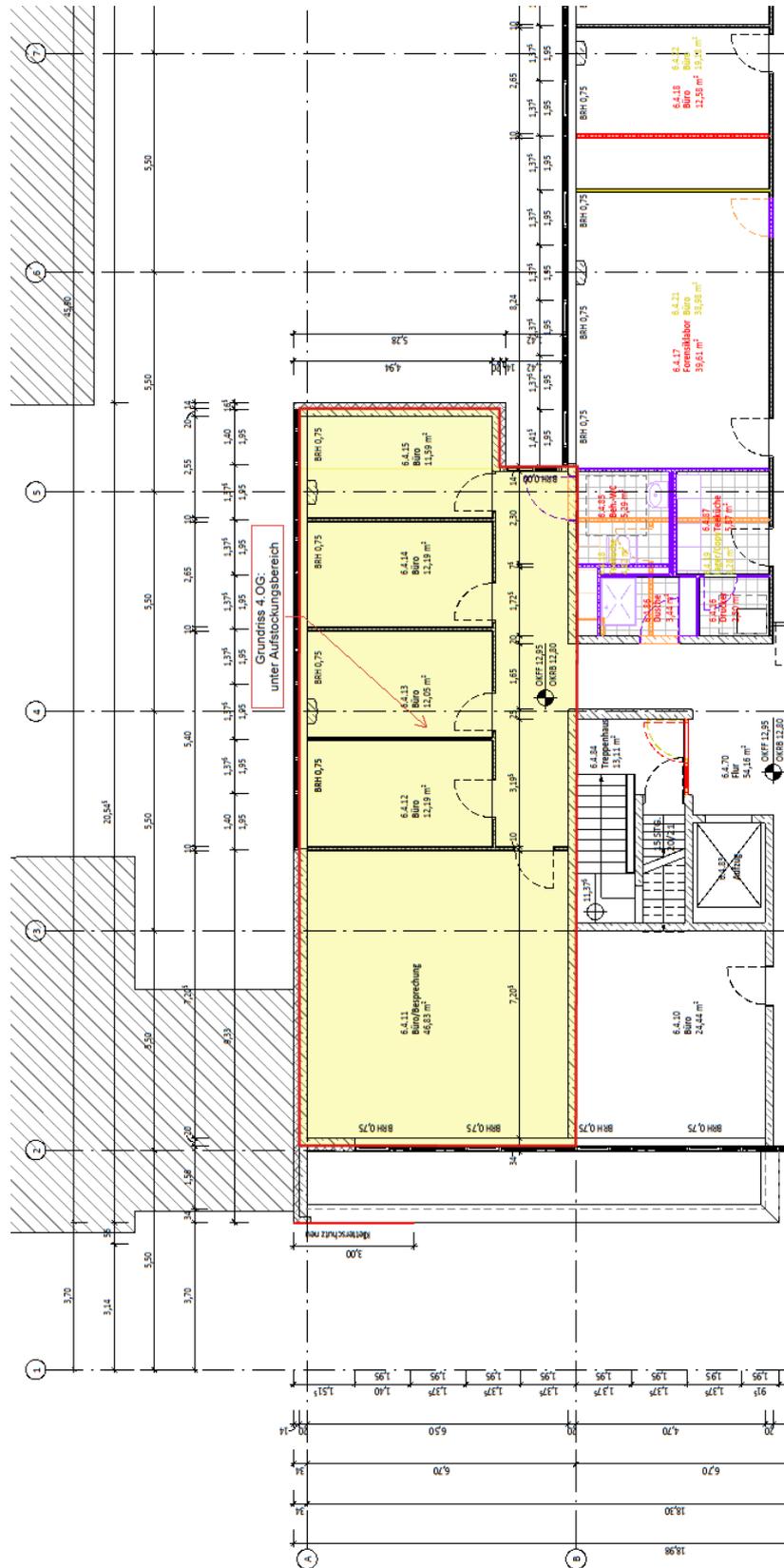
Diese Forschungsarbeit sollte dazu beitragen, ein Bewusstsein dafür zu schaffen, dass die Integration nachwachsender Rohstoffe wie Holz eine zentrale Rolle im nachhaltigen Bauen und in Nachverdichtungen spielt. Des Weiteren sollen die Ergebnisse dieser Arbeit eine Referenz bilden, auf die Bauherrenberater bzw. Architekten und Ingenieure als Entscheidungshilfe für den Bauherrn zurückgreifen können. Weitere Themenfelder wie **baurechtliche Hürden**, die dem Holzbau gegenüberstehen, und das **Recyclingpotenzial** bzw. die **Wiederverwendbarkeit** könnten im größeren Rahmen untersucht werden und zu einem präziseren Ergebnis führen (vgl. Abbildung 57).



Abbildung 57 Übersicht der Themen und Ausblick ¹²⁶

¹²⁶ Eigene Darstellung.

Anhang 2: Grundriss 4.OG unterhalb Aufstockung



Anhang 3: Materialmengenermittlung Wände

Wände								
Holztafelwand								
Bestandteile	Material	Höhe [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Bezugsfläche [m ²]	Menge [m ³ /m ²]	Wandfläche [m ²]	Volumen [m ³]
Rippen vertikal	KVH	2,74	0,08	0,16	3,625	0,01935	122,30	2,36658
Rippen horizontal	KVH	0,08	1,25	0,16	3,625	0,00883	122,30	1,07965
Summe						0,02818	122,30	3,44623
Bepankung	OSB	2,90	0,020	0,145	3,625	0,04000	122,30	4,89215
Befestigungsmittel	Verzinkte Schrauben					0,50 kg/m ²	122,30	61,15 kg
Brettsperrholzwand								
Bestandteile	Material	Höhe [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Bezugsfläche [m ²]	Menge [m ³ /m ²]	Wandfläche [m ²]	Volumen [m ³]
Wandelement	Brettsperrholz	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	122,30	24,46073
Brettschichtholzwand								
Bestandteile	Material	Höhe [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Bezugsfläche [m ²]	Menge [m ³ /m ²]	Wandfläche [m ²]	Volumen [m ³]
Wandelement	Brettschichtholz	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	122,30	24,46073
Stahlbetonwand								
Bestandteile	Material	Höhe [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Bezugsfläche [m ²]	Menge [m ³ /m ²]	Wandfläche [m ²]	Volumen [m ³]
Beton	C 30/37	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	122,30	24,46073
Bestandteile	Material	Volumen [m ³]	Bewehrungsgehalt [kg/m ³]		Bewehrungsmenge [kg]	Bewehrungsmenge [t]		
Bewehrung	B500 A (Q 524 A)	24,46073	100,00		2.446,073	2,44607		

Anhang 4: Materialmengenermittlung Decken

Decken								
Brettsperrholzdecke								
Bestandteile	Material	Höhe [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Bezugsfläche [m ²]	Menge [m ³ /m ²]	Deckenfläche [m ²]	Volumen
Deckenelement	Brettsperrholz	0,24	1,00	1,00	1,00	0,24	127,32	30,55680
Brettschichtholzdecke								
Bestandteile	Material	Höhe [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Bezugsfläche [m ²]	Menge [m ³ /m ²]	Deckenfläche [m ²]	Volumen
Deckenelement	Brettschichtholz	0,20	1,00	1,00	1,00	0,20	127,32	25,46400
Lignatur-Kastendecke (Elementbreite 1,00 m)								
Bestandteile	Material	Höhe [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Bezugsfläche [m ²]	Menge [m ³ /m ²]	Deckenfläche [m ²]	Volumen [m ³]
Träger vertikal (5x)	KVH	0,25	0,031	1,00	1,00	0,03875	127,32	4,93365
Träger horizontal (2x)	KVH	0,031	1,690	1,00	1,00	0,05239	127,32	6,67029
Summe						0,09114	127,32	11,60394
Holzbetonverbunddecke								
Bestandteile	Material	Höhe [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Bezugsfläche [m ²]	Menge [m ³ /m ²]	Deckenfläche [m ²]	Volumen [m ³]
Brettstapelholzdecke	KVH	0,15	1,00	1,00	1,00	0,15	127,32	19,09800
Bestandteile	Material	Höhe [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Bezugsfläche [m ²]	Menge [m ³ /m ²]	Deckenfläche [m ²]	Volumen [m ³]
Aufbeton	C 50/60	0,08	1,00	1,00	1,00	0,08	127,32	10,18560
Bestandteile	Material	Volumen [m ³]	Bewehrungsgehalt [kg/m ³]		Bewehrungsmenge [kg]	Bewehrungsmenge [t]		
Bewehrung	Betonstahlmatten B500 A (Q 524 A)	10,18560	109,65		1.116,85	1,11685		
Stahlbeton-Flachdecke								
Bestandteile	Material	Höhe [m]	Breite [m]	Tiefe [m]	Bezugsfläche [m ²]	Menge [m ³ /m ²]	Deckenfläche [m ²]	Volumen [m ³]
Beton	C 30/37	0,28	1,00	1,00	1,00	0,28	127,32	35,64960
Bestandteile	Material	Volumen [m ³]	Bewehrungsgehalt [kg/m ³]		Bewehrungsmenge [kg]	Bewehrungsmenge [t]		
Bewehrung	Betonstabstahl B500 A	35,64960	125,00		4.445,20	4,45620		
Spannbeton-Fertigdecke								
Deckentyp	Deckenhöhe [m]	Beton	Spannstahl Zugfestigkeit		Hohlraumanteil [%]	Flächengewicht [kg/m ²]		
A20B	0,20	C40/45	1570/1770		40,00	319,00		
Vergussfugen								
Material	Füllmenge [m ³]	Fugen (St)	Fugenlänge [m]		Vergussmenge [m ³]			
Beton C20/25	0,009	15	6,90		0,9315			
Beton C20/25	0,009	1	5,00		0,045			
Summe					0,9765			

Anhang 5: Vorbemessung Spannbeton-Fertigdecke



DW SYSTEMBAU GMBH
Stockholmer Straße 1
29640 Schneverdingen

Fon +49(0) 5193 85 0

www.dw-systembau.de
info@dw-systembau.de

Statischer Nachweis für BRESPA®-Decken (Vorbemessung)

BV: Vorbemessung - Position: BRESPA®-Decke

Grundlagen

Statik erstellt nach DIN EN 1168, DIN EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-1/NA für Deutschland, DIN EN 13369, DIN EN 206-1 zusätzlich gelten folgende Merkblätter: Industrierichtlinie und Merkblatt „biegeweiche Auflagerung“ vom Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken

Vorbemerkungen:

Schnittkräfte im Bereich von Einzellasten, Linienlasten und Aussparungen:

Die mitwirkende Lastverteilungsbreite bei Spannbeton-Fertigdecken darf wie bei monolithischen Betonplatten gemäß DAfStb Heft 631 berechnet werden.

Torsion wird am freien Rand eines Deckenfeldes (vertikal und horizontal nicht unterstützt) berücksichtigt, indem b_{m3} auf max. 1,00 m reduziert wird.

Diagramme zur Ermittlung der Fugenquerkräfte bzw. der anteiligen Lasten benachbarter Platten in einem Deckenfeld für bestimmte Einzel- und Linienlaststellungen sind in DIN EN 1168, Anhang C (informativ) angegeben.

Die Breite von Aussparungen wird von der mitwirkenden Lastverteilungsbreite abgezogen.

Da es sich um eine Vorbemessung handelt, kann eine Überschreitung von bis zu 3 % der Ausnutzung toleriert werden.

Hinweis zur Querkraftbemessung:

Nach DIN EN 1168 muss bei biegeweicher Lagerung der abmindernde Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit berücksichtigt werden. Die genaue Berechnung ist im Merkblatt „Biegeweiche Auflagerung“ des Bundesverbandes Spannbeton-Fertigdecken zu entnehmen. Dieser Nachweis ist zu führen, wenn die Ausnutzung der Querkraft nach DIN EN 1168 Abs. 4.3.3.2.2 größer als 50% ist.

BV: Vorbemessung - Position: BRESPA®-Decke

Systemmaße

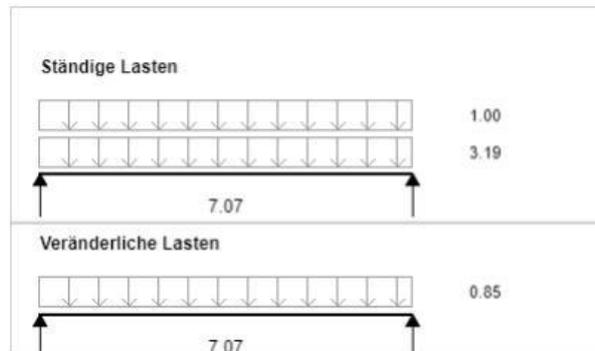
Feld	Feldbreite	1.20 m	Auflager	A	B	
	Lichte Weite	7.00 m		Auflagertiefe	0.10 m	0.10 m
	Stützweite	7.07 m		Typ	Biegesteif	Biegesteif

Einwirkungen

Kategorie	H1 - Schnee bis +1000 ü. NN		
Feld	Verkehrslast q_1 :	0.85 kN/m ²	
	LW-Zuschlag q_2 :	0.00 kN/m ²	
	Zus. Auflast g_1 :		1.00 kN/m ²
	Eigenlast Decke g		3.19 kN/m ²
Belastung q/g		0.85 kN/m ²	4.19 kN/m ²

Zusatzlasten

Lastart Abstand Länge F_q F_g



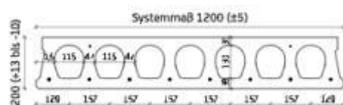
BV: Vorbemessung - Position: BRESPA®-Decke

Teilsicherheitsbeiwerte	gamma q:	1.50	gamma g:	1.35
Kombinationsbeiwerte	phi1:	0.20	phi2:	0.00
Expositionsklasse	XC1			
Feuerwiderstandsklasse	F90			

Bemessung

Bewehrung A20B/S8-D4

A20B 200 mm



Passplattenbreiten
 [mm] (±25)
 800; 900; 1000;
 1100; 1200; 1300

Deckenart:	Hohldecke
Deckentyp:	A20B
Deckendicke:	20cm
az,oben(mm ² /m):	65.00
az,unten(mm ² /m):	347.00

Nachweis der Biegetragfähigkeit

Feldmoment M_{Ed} 43.27 kNm/m \leq M_{Rd} 75.57 kNm/m = Ausnutzung 57.3%

Nachweis der Querkraftfähigkeit

Auflager A	$V_{Ed,ct1}$	24.49 kN/m	\leq	$V_{Rd,ct1}$	59.04 kN/m	= Ausnutzung	41.5% ***
	$V_{Ed,fl}$	14.80 kN/m	\leq	$V_{Rd,fl}$	25.33 kN/m	= Ausnutzung	58.5%
	$V_{Ed,ct2}$	8.20 kN/m	\leq	$V_{Rd,ct2}$	37.06 kN/m	= Ausnutzung	22.1%
Auflager B	$V_{Ed,ct1}$	24.49 kN/m	\leq	$V_{Rd,ct1}$	59.04 kN/m	= Ausnutzung	41.5% ***
	$V_{Ed,fl}$	14.80 kN/m	\leq	$V_{Rd,fl}$	25.33 kN/m	= Ausnutzung	58.5%
	$V_{Ed,ct2}$	8.20 kN/m	\leq	$V_{Rd,ct2}$	37.06 kN/m	= Ausnutzung	22.1%

Durchbiegung

vorhandene Durchbiegung (L/2043) = 3.46 mm zul. Durchbiegung L/500 = 14.13 mm

***Es wurde ein biegesteifes Auflager angenommen.

Anhang 6: CO₂-Bilanzierung - Wände

Variante	Lebenszyklusphase	Material	Menge [m ³ , kg, t]	GWP-Einheitswert [kg CO ₂ -Äq./m ³ , kg CO ₂ -Äq./t]	Ergebnis [kg CO ₂ - Äq.]	Summe [kg CO ₂ - Äq.]
Holztafelwand	A1-A3	KVH	3,44623	-727,00	-2.505,41	-5.421,31
		OSB	4,89215	-639,63	-3.127,55	
		Schrauben	61,15	1,73050	211,65	
	C3	KVH	3,44623	816,00	2.812,12	7.622,08
		OSB	4,89215	983,20	4.809,96	
		Schrauben	61,15	3,461	211,65	
	A1-A3 + C3	KVH	3,44623	89,00	306,71	2.200,77
		OSB	4,89215	343,90	1.682,41	
		Schrauben	61,15	3,461	211,65	
Brettsperrholzwand	A1-A3	Brettsperrholz	24,46073	-669,60	-16.378,90	
	C3	Brettsperrholz	24,46073	798,70	19.563,79	
	A1-A3 + C3	Brettsperrholz	24,46073	129,10	3.157,88	
Brettschichtholzwand	A1-A3	Brettschichtholz	24,46073	-668,20	-16.344,66	
	C3	Brettschichtholz	24,46073	825,60	20.194,78	
	A1-A3 + C3	Brettschichtholz	24,46073	157,40	3.850,12	
Stahlbetonwand mit Normalbeton	A1-A3	Beton C30/37	24,46073	257,7	6.303,53012	7.634,19
		Betonstahlmatten Q 524 A	2,446073	544,00	1.330,66371	
	C3	Beton C30/37	24,46073	14,9	364,46488	346,46
		Betonstahlmatten Q 524 A	2,446073	0	0	
	A1-A3 + C3	Beton C30/37	24,46073	272,60	6.667,53012	7.998,65
		Betonstahlmatten Q 524 A	2,446073	544,00	1.330,66371	
Stahlbetonwand mit Ökobeton	A1-A3	EcoPact Beton C30/37	24,46073	168,40	4.119,18693	5.449,85
		Betonstahlmatten Q 524 A	2,446073	544,00	1.330,66371	
	C3	EcoPact Beton C30/37	24,46073	3,848	94,12489	94,12
		Betonstahlmatten Q 524 A	2,446073	0	0	
	A1-A3 + C3	EcoPact Beton C30/37	24,46073	172,248	4.213,31182	5.554,98
		Betonstahlmatten Q 524 A	2,446073	544,00	544,00	
Stahlbetonwand mit Recyclingbeton	A1-A3	EcoPact R Beton C30/37	24,46073	177,90	4.351,56387	5.682,23
		Betonstahlmatten Q 524 A	2,446073	544,00	1.330,66371	
	C3	EcoPact R Beton C30/37	24,46073	3,632	88,84137	88,84
		Betonstahlmatten Q 524 A	2,446073	0	0	
	A1-A3 + C3	EcoPact R Beton C30/37	24,46073	181,53	4.440,40524	5.771,07
		Betonstahlmatten Q 524 A	2,446073	544,00	1.330,66371	

Anhang 7: CO₂-Bilanzierung - Decken

Variante	Lebenszyklusphase	Material	Menge [m ³ , t]	GWP- Einheitswert [kg CO ₂ -Äq./m ³ , kg CO ₂ -Äq./t]	Ergebnis [kg CO ₂ -Äq.]	Summe [kg CO ₂ -Äq.]
Brettsper Holzdecke	A1-A3	Brettsper Holz	30,55680	-669,60	-20.460,83	
	C3	Brettsper Holz	30,55680	798,70	24.405,71	
	A1-A3+C3	Brettsper Holz	30,55680	129,10	3.944,88	
Brettschich Holzdecke	A1-A3	Brettschich Holz	25,46400	-668,20	-17.015,04	
	C3	Brettschich Holz	25,46400	825,60	21.023,07	
	A1-A3+C3	Brettschich Holz	25,46400	157,40	4.008,03	
Lignatur	A1-A3	KVH	11,60394	-727,00	-8.436,06	
	C3	KVH	11,60394	816,00	9.468,81	
	A1-A3+C3	KVH	11,60394	89,00	1.032,75	
HBV	A1-A3	KVH	19,09800	-727,00	-13.884,24	-10.475,63
		Beton C 50/60	10,18560	275,00	2.801,04	
		Betonstahlmatten Q 524 A	1,11685	544,00	607,57	
	C3	KVH	19,09800	816,00	15.583,97	15.635,41
		Beton C 50/60	10,18560	5,05	51,44	
		Betonstahlmatten Q 524 A	1,11685	0	0	
	A1-A3+C3	KVH	19,09800	89,00	1.699,72	5.159,77
		Beton C 50/60	10,18560	280,05	2.852,48	
		Betonstahlmatten Q 524 A	1,11685	544,00	607,57	
Stahlbeton- Flachdecke mit Normalbeton	A1-A3	Beton C 30/37	35,64960	257,70	9.186,90	11.299,14
		Betonstabstahl	4,45620	474,00	2.112,24	
	C3	Beton C 30/37	35,64960	14,9	531,18	531,18
		Betonstabstahl	4,45620	0	0	
	A1-A3+C3	Beton C 30/37	35,64960	272,60	9.718,08	11.830,32
		Betonstabstahl	4,45620	474,00	2.112,24	
Stahlbeton- Flachdecke mit Ökobeton	A1-A3	EcoPact C 30/37	35,64960	168,40	6.003,39	8.115,63
		Betonstabstahl	4,45620	474,00	2.112,24	
	C3	EcoPact C 30/37	35,64960	3,848	137,18	137,18
		Betonstabstahl	4,45620	0	0	
	A1-A3+C3	EcoPact C 30/37	35,64960	172,25	6.140,64	8.252,88
		Betonstabstahl	4,45620	474,00	2.112,24	
Stahlbeton- Flachdecke mit Recyclingbeton	A1-A3	EcoPact R C 30/37	35,64960	177,90	6.342,06	8.454,30
		Betonstabstahl	4,45620	474,00	2.112,24	
	C3	EcoPact R C 30/37	35,64960	3,632	129,48	129,48
		Betonstabstahl	4,45620	0	0	
	A1-A3+C3	EcoPact R C 30/37	35,64960	181,53	6.471,47	8.583,71
		Betonstabstahl	4,45620	474,00	2.112,24	
Variante	Lebenszyklusphase	Material	Menge [m ² , m ³]	GWP- Einheitswert [kg CO ₂ -Äq./m ³ , kg CO ₂ -Äq./m ²]	Ergebnis [kg CO ₂ -Äq.]	Summe [kg CO ₂ -Äq.]
Spannbetondecke	A1-A3	Spannbeton- Fertigdecke	127,32	43,10	5.487,49	5.640,80
		Vergussbeton C 20/25	0,9765	157,00	153,31	
	C3	Spannbeton- Fertigdecke	127,32	0,56	71,30	76,23
		Vergussbeton C 20/25	0,9765	5,05	4,93	
	A1-A3+C3	Spannbeton- Fertigdecke	127,32	43,66	5.558,79	5.717,03
		Vergussbeton C 20/25	0,9765	162,05	158,24	

Anhang 8: Preisanfrage Spannbeton-Fertigdecke

Ali, Mier

Von: Rolfs Annett <Annett.Rolfs@DW-Systembau.de>
Gesendet: Freitag, 29. November 2024 14:40
An: Ali, Mier
Betreff: Preis ab Werk für die A20B WG: [External] Bachelor Thesis | CO2-Bilanzierung und Wirtschaftlichkeit einer Holzaufstockung auf Bürogebäuden
Anlagen: Vorbemessung_Spannbeton-Fertigdecke_A200B-S8-D4.pdf; Vorbemessung_Spannbeton-Fertigdecke_A200B-S8-D4_Büro.pdf; Skizze Aufstockungsbereich.pdf; DW177 002_EPD_A20B.pdf; Platteneinteilung und Vergussmengen.pdf; Bauseminare für Studierende.pdf

Sie erhalten nicht häufig E-Mails von annett.rolfs@dw-systembau.de. [Erfahren Sie, warum dies wichtig ist](#)

Hallo, Ali Mier,

ich freue mich, dass Sie ein Thema mit Spannbeton-Fertigdecken bei Ihrer Bachelorarbeit haben. Die vorbereitete Deckenplatte A20B hat einen **Preis ab Werk von 45,00 €/m²**. Da immer die gleiche Bespannung S8-D4 ermittelt wurde, ist es bei Büro- als auch Dachlasten der gleiche Preis.

Ich wünsche Ihnen ein schönes Wochenende und gutes Gelingen.



i. A. Annett Rolfs
Vertrieb Backoffice (Sales / Backoffice)
CONSOLIS DW SYSTEMBAU GMBH

annett.rolfs@dw-systembau.de
Tel. +49 (0) 5193 85 53
Fax +49 (0) 5193 85 953
www.dw-systembau.de

Geschäftsführer: Eduard van der Meer, Martin te Lintelo, Lutz Busching · Amtsgericht: Lüneburg HRB 202048 · Sitz der Gesellschaft: Stockholmer Straße 1, D-29640 Schneverdingen · U St.-Id.Nr. DE 370 277 009- Steuer-Nr. 41 203 06398

Anhang 9: Preisanfrage Holzbauelemente

Ali, Mier

Von: Wolfgang Müll <W.Muell@holzbau-amann.de>
Gesendet: Dienstag, 26. November 2024 18:03
An: Ali, Mier
Betreff: AW: Bachelor Thesis | CO2 Bilanzierung und Wirtschaftlichkeit von
Holzaufstockungen auf Bürogebäuden

Hallo Herr Ali,

anbei die Preise netto ohne Mwst:

Zu 1. Holztafelbauwände

Ständerwand 16 cm aus KVH, Pfosten, Rähm und Schwelle	→ 70 €/m ²
2 x OSB-Bepanung t = 2 5mm	→ 34 €/m ²
Verbindungsmittel für Ständer und Platten	→ 5 €/m ²
Transport	→ 7 €/m ²
Montage	→ 15 €/m ²
Gesamt	ca. 131 €/m²

Zu 2. Brettsperholz

Wandelement, d = 20 cm, 5-schichtig	→ 130 €/m ²
Verbindungsmittel	→ 4 €/m ²
Transport	→ 7 €/m ²
Montage	→ 15 €/m ²
Gesamt	ca. 156 €/m²

Deckenelement, d = 24 cm, 7-schichtig	→ 180 €/m ²
Verbindungsmittel	→ 4 €/m ²
Transport	→ 8 €/m ²
Montage	→ 20 €/m ²
Gesamt	ca. 212 €/m²

Zu 3. Brettschichtholz

Wandelement, d = 20 cm	→ 115 €/m ²
Verbindungsmittel	→ 4 €/m ²
Transport	→ 7 €/m ²
Montage	→ 15 €/m ²
Gesamt	ca. 156 €/m²

Deckenelement, d = 20 cm	→ 115 €/m ²
Verbindungsmittel	→ 4 €/m ²
Transport	→ 8 €/m ²
Montage	→ 20 €/m ²
Gesamt	ca. 147 €/m²

Zu 4. Lignatur Flächenelement

Flächenelement d = 240 mm	→ 180 €/m ²
Verbindungsmittel	→ 10 €/m ²
Transport	→ 8 €/m ²
Montage	→ 20 €/m ²
Gesamt	ca. 218 €/m²

Zu 5. HBV-Decke

Deckenelement BSP, d = 16 cm, 5-schichtig
Verbindungsmittel
Transport
Montage
Gesamt

→ 104 €/m²
→ 25 €/m²
→ 7 €/m²
→ 15 €/m²
ca. 151 €/m²

Aufbeton, Dicke 8 cm, C20/25, XC1, W0
Mattenstahl, B500 A

→ 450 €/m³ fertig montiert
→ 4,50 €/to fertig montiert

Zu Pkt. 6 + 7 kann ich Ihnen leider keine Angaben machen.

Hier noch die Skizze zu dem Flächenelement von Lignatur:

Das Hohlkastenelement ist 1 m breit und 24 cm hoch



Mit freundlichen Grüßen
Holzbau Amann GmbH

i. V. W. Müll
Vertrieb, Projektleitung

Tel: +49 7755 9201 0
Fax: +49 7755 9201 26
Tel Homeoffice: +49 7851 484216
Fax Homeoffice: +49 7851 484217
E-Mail: w.muell@holzbau-amann.de
Internet: www.holzbau-amann.de

Amtsgericht Freiburg i.Br. HRB 620 223

Geschäftsführer:
Bernhard Tritschler

Anhang 10: GWP-Werte bezogen auf die BGF - Wände

Variante	A1-A3 + C3 [kg CO ₂ -Äq.]	Brutto-Grundfläche [m ²]	A1-A3 + C3 [kg CO ₂ -Äq./m ² BGF]
Holztafelwand	2.201	127,32	17,29
Brettsperrholzwand	3.158	127,32	24,80
Brettschichtholzwand	3.850	127,32	30,24
Stahlbetonwand mit Normalbeton	7.999	127,32	62,83
Stahlbetonwand mit Ökobeton	5.554	127,32	43,62

Anhang 11: GWP-Werte bezogen auf die BGF - Decken

Variante	A1-A3 + C3 [kg CO ₂ -Äq.]	Brutto-Grundfläche [m ²]	A1-A3 + C3 [kg CO ₂ -Äq./m ² BGF]
Brettsperrholzdecke	4.008	127,32	31,48
Brettschichtholzdecke	3.945	127,32	30,98
Lignaturdecke	1.003	127,32	8,11
Holzbetonverbunddecke	5.160	127,32	40,53
Stahlbeton-Flachdecke mit Normalbeton	11.830	127,32	92,92
Stahlbeton-Flachdecke mit Ökobeton	5.554	127,32	64,82
Spannbeton-Fertigdecke	5.717	127,32	44,90

Literaturverzeichnis

- Bundesministerium für Wirtschaft und Klima: Entwurf eines Klimaschutzprogramms, Berlin, 2023.
- Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina: Klimawandel: Ursachen, Folgen und Handlungsmöglichkeiten, MyCoRe Community, o. O., 2021.
- Deutscher Bundestag: Klimaschutzbericht 2024, Berlin, 2024 (20. Wahlperiode).
- Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 5034-1: Tageslicht in Innenräumen - Teil 1: Begriffe und Mindestanforderungen, Berlin, 2021a.
- Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 15643: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertungsmethodik – Rahmenbedingungen, Berlin, 2021b.
- Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Berlin, 2021c.
- Intergovernmental Panel on Climate Change: Klimawandel: Eine Zusammenfassung für alle, Genf, 2021.
- Kaufmann, Hermann; Krötsch, Stefan; Winter, Stefan: Atlas mehrgeschossiger Holzbau: Grundlagen - Konstruktionen - Beispiele, 5. Aufl., Detail Business Information, München, 2024.
- Krötsch, Stefan; Stieglmeier, Manfred; Engel, Thomas: Holzbau im Bestand, Detail Business Information, München, 2024.
- Kürschner, Kai: Klimaeffiziente Holzkonstruktionen im Geschossbau, Kapitel 6, Stuttgart, 2024a.
- Kürschner, Kai: Klimaeffiziente Holzkonstruktionen im Geschossbau, Kapitel 2, Stuttgart, 2024b.
- Kürschner, Kai: Nachhaltige und ressourceneffiziente Geschossbauten, Kapitel 3, Stuttgart, 2024c.
- Kürschner, Kai: Nachhaltige und ressourceneffiziente Geschossbauten, Kapitel 6, Stuttgart, 2024d.
- Maren, Fath et al.: Zukunft Bau Leitlinie Aufstockung, Fraunhofer IRB, o.O., 2019.

Morell, Uwe: Baupreise für Hoch- und Objektbau 2023, Köln, 2023.

Sobek, Werner: Non nobis - Über das Bauen in der Zukunft, Band 1: Ausgehen muss man von dem, was ist, 5. Aufl., Stuttgart, 2022.

United Nations Environment Programme: 2020 Global Status Report for Buildings and Construction, Nairobi, 2020.

Weidner, Stefanie et al.: Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien, in: Beton- und Stahlbetonbau, 2021, Band 116, Ausgabe 12, S. 969–977.

Internetquellen

- URL 1** Bundesregierung: Neues Klimaschutzgesetz ist in Kraft, 17.07.2024, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/klimaschutzgesetz-2197410> (24.11.2024, 21:16)
- URL 2** Umweltbundesamt: Häufige Fragen zum Klimawandel, in: Umweltbundesamt, 15.03.2021, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel> (28.11.2024, 13:18)
- URL 3** Wilke, Sibylle: Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen, 17.05.2024, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen> (29.11.2024, 10:35)
- URL 4** Gebäudeforum: CO2-Bilanzierung, 11.2022, <https://www.gebaeudeforum.de/wissen/nachhaltiges-bauen-und-sanieren/lebenszyklusbetrachtung/co2-bilanzierung> (16.12.2024, 08:47)
- URL 5** PricewaterhouseCoopers: Vertikale Verdichtung: Lebensraum Stadt nachhaltig und zukunftsfähig gestalten, 08.2023, <https://www.pwc.de/de/real-estate/vertikale-verdichtung-lebensraum-stadt-nachhaltig-und-zukunftsaehig-gestalten.html> (02.12.2024, 18:47)
- URL 6** Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen: Auftakt "Bündnis bezahlbarer Wohnraum", 27.04.2022, <https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/pressemitteilungen/Webs/BMWSB/DE/2022/04/buendnis-bezahlbarer-wohnraum.html> (04.12.2024, 11:07)
- URL 7** Statistisches Bundesamt: 0,3 % weniger fertiggestellte Wohnungen im Jahr 2023, 23.05.2024.-c, https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/05/PD24_203_31121.html (04.12.2024, 11:41)

- URL 8** PricewaterhouseCoopers: Vertikale Verdichtung: Lebensraum Stadt nachhaltig und zukunftsfähig gestalten, 08.2023.-b, <https://www.pwc.de/de/real-estate/vertikale-verdichtung-lebensraum-stadt-nachhaltig-und-zukunftsfahig-gestalten.html> (02.12.2024, 18:47)
- URL 9** DGNB: Nachhaltigkeitsansatz der DGNB, o. J., <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/nachhaltigkeitsansatz-der-dgnb> (04.12.2024, 17:38)
- URL 10** DGNB: Nachhaltigkeitsansatz der DGNB, o. J., <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/nachhaltigkeitsansatz-der-dgnb> (04.12.2024, 17:38)
- URL 11** Sobek, Werner: 17 Thesen zur Nachhaltigkeit, o. J., https://www.wernersobek.com/de/themen/17_thesen/ (04.12.2024, 22:44)
- URL 12** Binderholz: Brettschichtholz BSH Deckenelemente, 11.04.2022, <https://www.binderholz.com/news/details/brettschichtholz-bsh-deckenelemente> (16.12.2024, 16:35)
- URL 13** Binderholz: Brettschichtholz BSH Deckenelemente, 11.04.2022, <https://www.binderholz.com/news/details/brettschichtholz-bsh-deckenelemente> (16.12.2024, 16:35)
- URL 14** Ag, Lignatur: LIGNATUR - das tragende Element für Dächer und Decken, o. J., <https://www.lignatur.ch/produkt/das-element> (16.12.2024, 16:39)
- URL 15** Borbe, André: Stahlbeton: Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, 02.12.2024, <https://www.haus.de/bauen/stahlbeton-38697> (15.12.2024, 13:00)
- URL 16** Holcim: Nachhaltige betone, 2024, <https://www.holcim.de/nachhaltige-betone> (15.12.2024, 12:17)

- URL 17** DW-Systembau: Wirtschaftlich. nachhaltig. schnell. Wandelbar, o. J., <https://www.dw-systembau.de/start.html> (16.12.2024, 16:41)
- URL 18** Holcim: HOLCIM PREISLISTE 2023, 2023b, https://www.holcim.de/sites/germany/files/2022-12/holcim_preisliste_beton_2023_stuttgart.pdf (13.12.2024, 16:16)
- URL 19** Kapellmann: Erstes Bundesland führt CO2-Schattenpreis ein, 02.08.2023, <https://kapellmann.de/de/beitraege/erstes-bundesland-fuehrt-co2-schattenpreis-ein> (14.12.2024, 12:15)
- URL 20** Wilke, Sibylle: Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen, 26.11.2024-b, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen> (14.12.2024, 11:49)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Vorgehensweise	3
Abbildung 2 Anteile der Treibhausgase	4
Abbildung 3 Verteilung der globalen CO ₂ -Emissionen	6
Abbildung 4 Vorgehensweise einer CO ₂ -Bilanzierung	7
Abbildung 5 Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15643.....	8
Abbildung 6 Cradle to Gate, Cradle to Grave, und Cradle to Cradle	9
Abbildung 7 Jährliche Baufertigstellungen	10
Abbildung 8 Dreisäulenmodell der Nachhaltigkeit.....	11
Abbildung 9 Holzbauweise und Holzbaulemente.....	14
Abbildung 10 Lageplan des Bestandsgebäudes	15
Abbildung 11 Visualisierung des Aufstockungsbereichs.....	16
Abbildung 12 CAD-Skizze Grundriss Aufstockungsbereich	17
Abbildung 13 CAD-Skizze 4. Obergeschoss unterhalb des Aufstockungsbereichs	18
Abbildung 14 Berechnungsschema der CO ₂ -Bilanzierung	31
Abbildung 15 GWP-Berechnung Holztafelwände	32
Abbildung 16 GWP-Berechnung Brettsperrholzwand	33
Abbildung 17 GWP-Berechnung Brettschichtholzwand	34
Abbildung 18 GWP-Berechnung Brettschichtholzdecke	34
Abbildung 19 GWP-Berechnung Brettstapelholzdecke.....	35
Abbildung 20 GWP-Berechnung Lignaturdecke.....	36
Abbildung 21 GWP-Berechnung Holzbetonverbunddecke.....	37
Abbildung 22 GWP-Berechnung Holzbetonverbunddecke.....	37
Abbildung 23 GWP-Berechnung Holzbetonverbunddecke.....	38
Abbildung 24 Materialanteile an den gesamten CO ₂ -Emissionen	38
Abbildung 25 GWP-Berechnung Stahlbetonwand mit Ökobeton	39
Abbildung 26 Materialanteile an den gesamten CO ₂ -Emissionen	39
Abbildung 27 GWP-Berechnung Stahlbetonwand mit Recyclingbeton	40
Abbildung 28 Materialanteile an den gesamten CO ₂ -Emissionen	40
Abbildung 29 GWP-Berechnung Stahlbetondecke	41
Abbildung 30 Materialanteile an den gesamten CO ₂ -Emissionen	41
Abbildung 31 GWP-Berechnung Stahlbeton-Flachdecke mit Ökobeton	42
Abbildung 32 Materialanteile an den gesamten CO ₂ -Emissionen	42
Abbildung 33 GWP-Berechnung Stahlbeton-Flachdecke mit Recyclingbeton	43
Abbildung 34 Materialanteile an den gesamten CO ₂ -Emissionen	43
Abbildung 35 GWP-Berechnung Spannbeton Fertigteildecke	44
Abbildung 36 GWP-Gegenüberstellung der Wandvarianten	45
Abbildung 37 GWP-Gegenüberstellung der Deckenvarianten.....	47
Abbildung 38 Gewichtsvergleich der Wandvarianten	48
Abbildung 39 Gewichtsvergleich der Deckenvarianten	49
Abbildung 40 Berechnungsmodell der Materialkosten	50
Abbildung 41 Gesamtkosten der Materialien	51
Abbildung 42 Gesamtkosten der Materialien	51
Abbildung 43 Gesamtkosten der Materialien	52
Abbildung 44 Gesamtkosten der Materialien	52
Abbildung 45 Gesamtkosten der Materialien	53
Abbildung 46 Gesamtkosten der Materialien	53

Abbildung 47 Gesamtkosten der Materialien	54
Abbildung 48 Gesamtkosten der Materialien	54
Abbildung 49 Gesamtkosten der Materialien	55
Abbildung 50 Gesamtkosten der Materialien	55
Abbildung 51 Gesamtkosten der Materialien	56
Abbildung 52 Gesamtkosten der Materialien	56
Abbildung 53 CO ₂ -Schattenpreismodell und Gesamtkosten.....	57
Abbildung 54 Gesamtkostenübersicht der Wände.....	60
Abbildung 55 Gesamtkostenübersicht der Decken.....	61
Abbildung 56 Bewertungsmatrix für die Aufstockungsvarianten.....	63
Abbildung 57 Übersicht der Themen und Ausblick	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Flächenermittlung	18
Tabelle 2 Annahme eines statischen Entwurfs.....	19
Tabelle 3 GWP-Einheitswerte für die Holzbauweise	25
Tabelle 4 GWP-Einheitswerte für die Massivbauweise.....	26
Tabelle 5 Mengenermittlung Holztafelwand	26
Tabelle 6 Materialmengenermittlung Brettschichtholz- und Brettsperrholzwand	27
Tabelle 7 Materialmengenermittlung Stahlbetonwand	28
Tabelle 8 Materialmengenermittlung Stahlbetonwand Bewehrungsanteil	28
Tabelle 9 Materialmengenermittlung Brettsperrholz- und Brettstapelholzecke	28
Tabelle 10 Materialmengenermittlung Kastendecke-Lignatur	29
Tabelle 11 Materialmengenermittlung Holzbetonverbunddecke.....	29
Tabelle 12 Materialmengenermittlung Holzbetonverbunddecke Bewehrungsanteil.....	29
Tabelle 13 Materialmengenermittlung für Stahlbetonflachdecke.....	30
Tabelle 14 Materialmengenermittlung Stahlbeton-Flachdecke mit Bewehrungsanteil.....	30
Tabelle 15 Einheitspreise der Materialien	50
Tabelle 16 CO ₂ -Bepreisung und Gesamtkosten der Wände.....	58
Tabelle 17 CO ₂ -Bepreisung und Gesamtkosten der Decken.....	59
Tabelle 18 Punktesystem der Wände	62
Tabelle 19 Punktesystem der Decken	63

Abkürzungsverzeichnis

BGF	Brutto-Grundfläche
CO₂	Kohlenstoffdioxid
EPD	Environmental Product Declaration
GWP	Global Warming Potential
OSB	Oriented Strand Board

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Verwendung anderer als der angegebenen Hilfsmittel verfasst habe. Hinsichtlich einer möglichen Anwendung von KI-basierten Hilfsmitteln bestätige ich, dass ich diese maximal unterstützend und äußerst reflektiert eingesetzt habe, d. h. nicht damit generierte Textteilfragmente wie z. B. ganze Sätze, Textabschnitte oder Abbildungen in die Arbeit übernommen habe, außer diese sind als solche explizit gekennzeichnet. Für die auf dieser Grundlage integrierten KI-basierten Inhalte trage ich die Verantwortung vollumfänglich selbst, d. h. auch für die eventuell fehlerhaften Inhalte oder Referenzen sowie für die potentiellen Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder für Plagiate. Ich habe sämtliche verwendeten Quellen erwähnt und gemäß gängigen wissenschaftlichen Regeln korrekt zitiert. Die Arbeit oder Auszüge davon wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt

Stuttgart, 02.01.2025



Unterschrift

Sperrvermerk

„Die vorliegende Arbeit enthält firmeninterne Informationen und vertrauliche Daten. Deshalb bleibt diese Arbeit für die Öffentlichkeit gesperrt und darf nur zu Prüfungszwecken innerhalb der Hochschule für Technik Stuttgart verwendet werden.“

Stuttgart, 02.01.2025



Unterschrift