

INNOVATION

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

Einfach Bauen

Material, Recyclingfähigkeit und Lebenszyklus

DER BAYERISCHE BAUINDUSTRIEVERBAND E.V.

- Wirtschaftsverband
- Tarifpartner
- Bildungsträger
- Informationen für den Bau

Der Bayerische Bauindustrieverband ist mit all seinen Leistungen seinen Mitgliedern verpflichtet. Dazu gehören eine umfassende Information und Beratung der Mitgliedsfirmen in politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Fragen, die Sicherung branchenspezifischer Aus- und Weiterbildung, die Verhandlung von Tarifverträgen, die Schaffung einer Plattform zum Erfahrungsaustausch zwischen den Unternehmen der Bauindustrie und die Förderung von Innovationen in Forschung und Entwicklung.

INNOVATION

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

**EINFACH
BAUEN**

Abkürzungsverzeichnis und verwendete Einheiten

| | |
|-------|---|
| GWP | Global Warming Potential (Treibhauspotenzial) |
| LCA | Life Cycle Analysis (Lebenszyklusbetrachtung) |
| MwSt. | Mehrwertsteuer |
| NRF | Nettoraumfläche, Summe der nutzbaren Grundflächen eines Gebäudes. Dazu zählen die Nutzungsfläche (NUF), die Technikfläche (TF) und die Verkehrsfläche (VF). |
| QNG | Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude |

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Inhalt | 5 |
| Vorwort | 6 |
| Zusammenfassung | 7 |
| Einführung | 8 |
| 3.1. Einfach Bauen..... | 8 |
| 3.2. Umweltwirkung während des Lebenszyklus..... | 9 |
| Projekt und Gebäudevorstellung | 10 |
| Methodisches Vorgehen | 15 |
| 5.1. Umweltindikatoren und Module..... | 15 |
| 5.2. Datengrundlage, Betrachtungszeitraum, Bilanzgrenzen..... | 16 |
| Ergebnisse | 18 |
| 6.1. Ergebnisse auf Bauteilebene..... | 18 |
| 6.2. Ergebnisse auf Gebäudeebene..... | 26 |
| 6.3. Fazit und Ausblick..... | 32 |
| Tabellenverzeichnis | 38 |
| Abbildungsverzeichnis | 39 |
| Literaturverzeichnis | 41 |

I. Vorwort

Wohngebäude sollen heute nicht nur standfest sein und vor Witterung schützen, sondern auch Komfort bieten, dabei aber auch wenig Energie verbrauchen. Um all das zu leisten, werden Wände und Decken immer dicker und undurchlässiger. Als Folge lüften die Bewohner entweder zu wenig und produzieren dadurch Feuchteschäden oder zu viel und verschwenden dabei Energie. Als Gegenmaßnahme wird dann Gebäudetechnik eingesetzt, die wiederum betrieben, gepflegt und regelmäßig gewartet werden muss. Das alles macht die Planung, den Bau aber auch die Nutzung oder einen späteren Umbau kompliziert und teuer.

Bei der Plus-Energie-Schule Schmuttertal, Gymnasium bei Augsburg, die Florian Nagler Architekten zusammen mit Herrmann Kaufmann Architekten gebaut haben, waren drei Jahre Monitoring erforderlich, um die Gebäudetechnik einzuregulieren. Aber auch das Bauwerk selbst hat Planende und Handwerker bis zur Leistungsgrenze gefordert.

Als Reaktion auf diese und ähnliche Erfahrungen auch in anderen Bauprojekten entstand die Idee, nach Wegen zu suchen, die es ermöglichen, wieder einfacher zu bauen. 2016 wurde dazu eine Serie von drei Forschungsprojekten an der TU München gestartet. Dabei wurden Konzepte für einfache Wohngebäude entwickelt. Mit der B&O Gruppe als Bauherr wurden daraufhin drei Forschungshäuser in Bad Aibling gebaut und danach Raumklima und Energieverbrauch im bewohnten Zustand zwei Jahre lang gemessen. Das Projekt wurde mehrfach publiziert und erhielt den Deutschen Nachhaltigkeitspreis. Die Forschungshäuser konnten demonstrieren, dass es möglich ist, einfache Häuser zu bauen, die von sich aus wenig Raumwärme brauchen und im Sommer nicht überhitzen. Die Technik kann dadurch auf ein robustes Maß reduziert werden.

Eine Erkenntnis der Forschungshäuser ist auch, dass bei den Grauen Emissionen noch Verbesserungen möglich sind. Als Graue Emissionen werden die Treibhausgase zusammengefasst, die bei der Herstellung, dem Austausch und der Entsorgung vom Gebäude und Gebäudetechnik entstehen. Die B&O Gruppe hat deshalb zusammen mit Florian Nagler Architekten ein viertes Forschungshaus gebaut, bei dem für die tragenden Bauteile Holz und Lehm verwendet wurden. Dadurch konnten die Grauen Emissionen noch einmal reduziert werden. Die vorliegende Publikation führt in das Thema „Einfach Bauen“ ein, erläutert die Forschungshäuser und vergleicht ausführlich die Bauweisen der vier Forschungshäuser in ihrer Umweltwirkung.

II. Zusammenfassung

Bei dem vorliegenden Forschungsprojekt an der TU München wurden mithilfe von Simulationen eines einzelnen Raumes über 2000 Variationen von Raumgeometrie, Fenstergröße, Glasart, Material, Wetter und Nutzerverhalten getestet und miteinander verglichen. Dabei zeigten sich Varianten, die einem typischen Gründerzeitbau nahekommen, als die robustesten. Das Ergebnis überrascht nicht, da diese Bauformen sich aus einer Bautradition entwickelten, in der es noch keine Klimaanlage oder Fußbodenheizungen gab.

Die Ergebnisse mündeten in drei Forschungshäusern in Bad Aibling. Durch die B&O Gruppe wurden dafür im Jahr 2020 drei Wohngebäude mit insgesamt 23 Wohnungen errichtet. Die drei Gebäude unterscheiden sich durch Wahl der tragenden Konstruktion: Einschalige Außenwände aus Luftkammerziegel, Massivholz und Infralichtbeton. Alle drei Gebäude haben eine 30 cm dicke Stahlbetondecke, ein Satteldach und wurden nicht unterkellert.

Die Ergebnisse aller drei Forschungsprojekte sind inzwischen veröffentlicht und können auf unserer Webseite unter einfach-bauen.net/#downloads heruntergeladen werden. Im Jahr 2023 wurde ein weiteres Forschungshaus aus Holz und Lehmstein fertiggestellt, wobei die Flächeneffizienz weiter optimiert wurde.

Die Baukosten der vier Forschungshäuser für Bauwerk und Haustechnik lagen zwischen 2.231 €/m² und 3.286 €/m² Wohnfläche zzgl. MwSt. Die Bauzeiten lagen zwischen 23 und 30 Wochen. Der Schwerpunkt dieser Publikation liegt in der Betrachtung der Umweltwirkung. Als Umweltindikator wurde das Treibhauspotenzial, auch Global Warming Potential (GWP), untersucht. Anhand der hier gezeigten Bauprojekte und deren LCA-Ergebnisse sollen die Umweltwirkungen von Baustoffen und Technikkomponenten, auch Graue Emissionen genannt, verglichen und Ansätze für eine Reduktion der Umweltwirkung aufgezeigt werden.

Die Grauen Emissionen der vier Forschungshäuser liegen zwischen 7 und 12 kg CO₂Äq./m²NRF*a. Vergleichbare dreigeschossige Mehrfamilienhäuser haben Graue Emissionen zwischen 16 und 18 kg CO₂Äq./m²NRF*a.

Die Gestaltung der Forschungshäuser mit Satteldächern, Fenstern geschützt durch tiefe Laibungen, sowie robusten, alterungsfähigen Oberflächen zeigt in der Betrachtung der Ökobilanz von Bauwerk und Haustechnik somit gute Ergebnisse. Der Vergleich der Gebäude untereinander zeigt, dass vor allem im Rohbau und in der Gebäudetechnik der größte Anteil an Grauen Emissionen liegt. Hier liegt das größte Potenzial zur Optimierung.

Der Einsatz nachwachsender Baustoffe hat ein hohes Potenzial zur späteren Weiterverwendung und kann dadurch die Grauen Emissionen teilweise ausgleichen. Die Untersuchung zeigt auch, dass selbst Anstriche, Abdichtungen und Verglasungen einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an den Grauen Emissionen haben. Der Grund dafür ist der mehrfache Austausch dieser Bauteile während der Lebenszeit des Gebäudes.

III. Einführung

3.1. Einfach Bauen

Das Konzept „Einfach Bauen“ verfolgt das Ziel, mit wenigen Materialien und einer reduzierten Anzahl an Bauteilschichten Gebäude zu konstruieren, die einfach zu bauen, zu warten und zu nutzen sind. Um den Energiebedarf niedrig und das Raumklima komfortabel zu halten, werden zuerst die Mittel der Architektur und danach reduzierte Technik einbezogen.

Um die Mittel der Architektur richtig einsetzen zu können, ist das Wissen über die Wechselwirkungen zwischen Material, Raum, Fassade, Wetter und Bewohner Voraussetzung. Zu diesem Zweck liefen an der TU München von 2016 bis 2023 drei aufeinanderfolgende Forschungsprojekte, die neben Zukunft Bau auch von der Bayerischen Bauwirtschaft gefördert wurden.

Im ersten Projektschritt wurden mithilfe von Simulationen eines einzelnen Raumes über 2000 Variationen von Raumgeometrie, Fenstergröße, Glasart, Material, Wetter und Nutzerverhalten getestet und miteinander verglichen. Dabei zeigten sich Varianten, die einem typischen Gründerzeitbau nahe kamen, als die robustesten. Räume mit einer Höhe von 3 m und einer Tiefe von 6 m, versehen mit einem hoch angesetzten Fenster, wiesen unabhängig von Nutzerverhalten einen reduzierten Energiebedarf im Winter und einen guten Komfort im Sommer auf. Sogar auf einen Sonnenschutz konnte verzichtet werden, wenn Decken, Wände und Boden ausreichend thermische Trägheit aufwiesen und die Glasfläche des Fensters angemessen groß war, d. h. 15 % der Raumfläche nicht überschritten wurde [Nagler et al. 2019].

Das Ergebnis überrascht nicht, da diese Bauformen sich aus einer Bautradition entwickelten, in der es noch keine Klimaanlage oder Fußbodenheizungen gab.



Abbildung 1: Die Forschungshäuser im Bau, Foto: Max Kratzer

Die Ergebnisse mündeten in drei Forschungshäusern in Bad Aibling. Durch die B&O Gruppe wurden dafür drei Wohngebäude mit insgesamt 23 Wohnungen errichtet. Die Gebäude haben einschalige Außenwände aus Luftkammerziegel, Massivholz und Infraleichtbeton. Alle drei Gebäude haben eine 30 cm dicke Stahlbetondecke, ein Satteldach und sind nicht unterkellert.

Die zweite Projektphase lief parallel zum Bau und der Planung der drei Forschungshäuser ab. Dabei wurde sichergestellt, dass die Erkenntnisse der Forschung in das Bauprojekt einfließen. Ein Konzept für Messungen in den Wohnungen wurde entwickelt und getestet [Jarmer et al. 2021].

Den Abschluss der Trilogie bildet das zweijährige Monitoring der Forschungshäuser von 2021 bis 2023. Dabei wurden mit über 100 Sensoren je Gebäude in zwei bewohnten und einer unbewohnten Wohnung gemessen. Die gesammelten Daten dokumentieren das Raumklima, das Lüftungsverhalten der Bewohner, den Energieverbrauch sowie den Feuchtetransport und Energietransport in der Außenwand. Zusätzlich zu den Messungen wurden die Bewohner zum Wohnkomfort befragt [Franke et al. 2023].

Die Ergebnisse aller drei Forschungsprojekte sind inzwischen veröffentlicht und können auf unserer Webseite unter einfach-bauen.net/#downloads heruntergeladen werden.

In einem Leitfaden wurden die Überlegungen und Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt knapp und übersichtlich zusammengefasst. Der Leitfaden richtet sich dabei an alle, die an einfachem Bauen interessiert sind und ist ebenfalls auf der Webseite verfügbar.

Über das zweijährige Monitoring gibt es zusätzlich noch eine Zusammenfassung, die einen schnellen Einstieg in die Thematik ermöglicht: Bauwelt 9.2023: <https://www.bauwelt.de/dl/1941484/artikel.pdf>

3.2. Umweltwirkung während des Lebenszyklus

Ein Schwerpunkt der Forschungstätigkeit zum Einfachen Bauen liegt in der Betrachtung der Umweltwirkung. Dabei werden die Prozesse der Gewinnung, Produktion und Entsorgung von Bauwerk und Gebäudetechnik, sowie der Austausch seiner Einzelteile, sprich der gesamte Lebenszyklus eines Hauses betrachtet. Diese Methode der Ökobilanz heißt LCA (engl. Life Cycle Assessment). Anhand der hier gezeigten Bauprojekte und deren LCA-Ergebnisse sollen die Umweltwirkungen von Baustoffen und Technikkomponenten verglichen und Ansätze für eine Reduktion der Umweltwirkung aufgezeigt werden.

IV. Projekt und Gebäudevorstellung

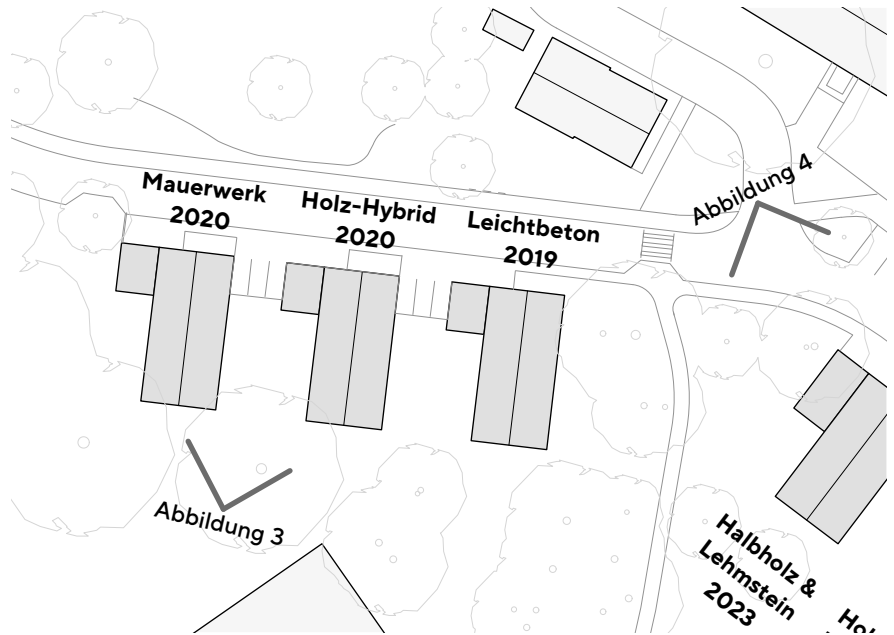


Abbildung 2: Lageplan der Forschungshäuser mit Angaben zu Material und Baujahr
Quelle: Florian Nagler Architekten



Abbildung 3: Blick in den Hof, links Mauerwerk, rechts Holz-Hybrid
Foto: Sebastian Schels, pk Odessa

Alle Gebäude haben drei Geschosse und einen eingeschossigen Anbau entlang der Straße. Der Anbau bildet einen halbprivaten Hof zwischen den Gebäuden und bietet den Bewohnern Abstellflächen sowie einen zu diesem Hof hin orientierten überdachten Freisitz. Alle Gebäude haben Satteldächer mit Dachüberstand und eine außenliegende Entwässerung.

Die ersten drei Forschungshäuser in den Bauweisen Mauerwerk, Holz-Hybrid und Leichtbeton entstanden bis 2020. Ein viertes Forschungshaus ist 2023 fertiggestellt worden. Die Außenwände von Haus 4 bestehen aus vertikalen Vollholzstielen mit einer Hanf-Jute-Dämmung, im Projekt „Halbholz“ genannt. Die tragenden Innenwände bestehen aus Lehmstein in Steinformat 2DF (zweifaches Dünnformat). Die Realisierung des Hauses 5 und 6 ist in 2024 und 2025 geplant. Weitere Informationen zu den Bauteilaufbauten der Gebäude werden im Kapitel VI erläutert.

Es war von Anfang an erklärtes Ziel der B&O Gruppe eine zweite Serie von Forschungshäusern zu realisieren. Die Erfahrungen die beim Bau und Betrieb der ersten drei Forschungshäuser gemacht wurden, sollten zur Optimierung der weiteren Häuser dienen.



Abbildung 4: Haus „Halbholz“, das vierte Forschungshaus
Foto: Sebastian Schels, pk Odessa

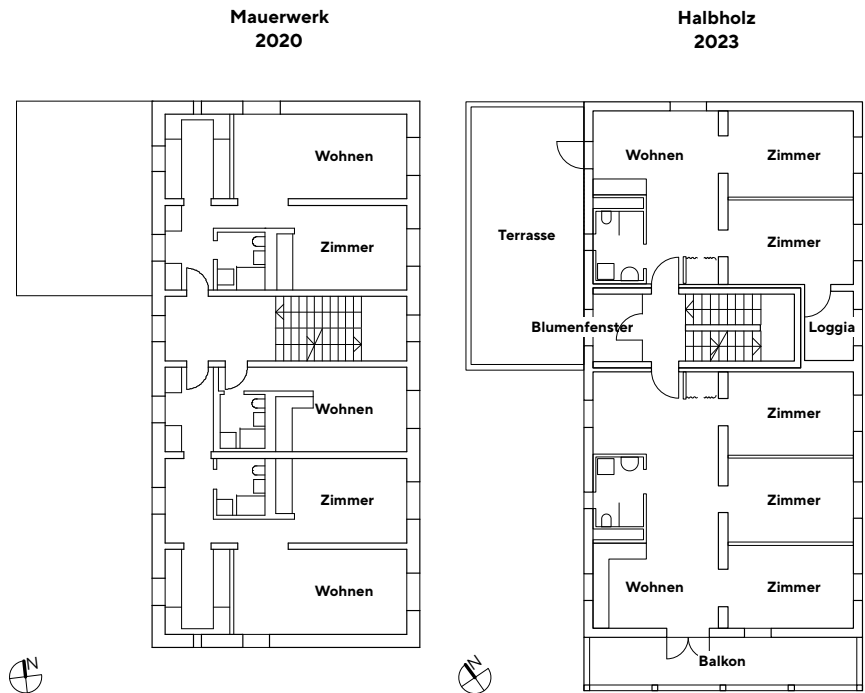


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Grundrisse der Häuser Mauerwerk und Halbholz
Quelle: Florian Nagler Architekten

In Abbildung 5 ist der Grundriss der Häuser Mauerwerk (2020) und Halbholz (2023) gegenübergestellt. Haus Halbholz wirkt durch die Balkone und den Anbau größer und ist 40 cm breiter und 10 cm kürzer. Die Außenwände sind etwas dünner, die Innenwände etwas dicker und laufen längs statt quer. Pro Geschoss gibt es nur zwei Wohnungseingänge, sodass neben dem Treppenhof noch eine Loggia und ein Blumenfenster möglich sind. Das Blumenfenster ist ein unbeheizter Pufferraum in dem Balkonpflanzen überwintern können. Beim Haus Halbholz sitzen die Bäder an der Außenwand und haben Fenster. Die Küchen liegen alle direkt am Sanitärstrang der Bäder. Pro Geschoss gibt es 5 Zimmer, die eine Belegung mit 5-7 Personen ermöglichen. Im Haus Holz-Hybrid sind es dagegen nur 3-6 Personen.

In Tabelle 1 sind die Flächen und Baukosten der vier Forschungshäuser gegenübergestellt. Haus Halbholz bietet mit Abstand die meiste Wohnfläche, wofür Balkone und Terrassen, die jeweils zur Hälfte der Wohnfläche angerechnet werden, verantwortlich sind. Die Baukosten beinhalten das Bauwerk und die Gebäudetechnik, also die Kostengruppen 300 und 400, jeweils ohne MwSt.

Tabelle 1: Flächen und Baukosten

| Haus | Mauerwerk | Holz-Hybrid | Leichtbeton | Halbholz |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| BGF(R) [m ²] | 632 | 632 | 632 | 628 |
| NRF(R) [m ²] | 453 | 463 | 445 | 488 |
| Wohnfläche [m ²] | 414 | 423 | 407 | 549 |
| Baukosten [€] | 968.000 | 1.121.000 | 1.321.000 | 1.225.000 |
| Baukosten/ Wohnfläche [€/m ²] | 2.338 | 2.650 | 3.246 | 2.231 |

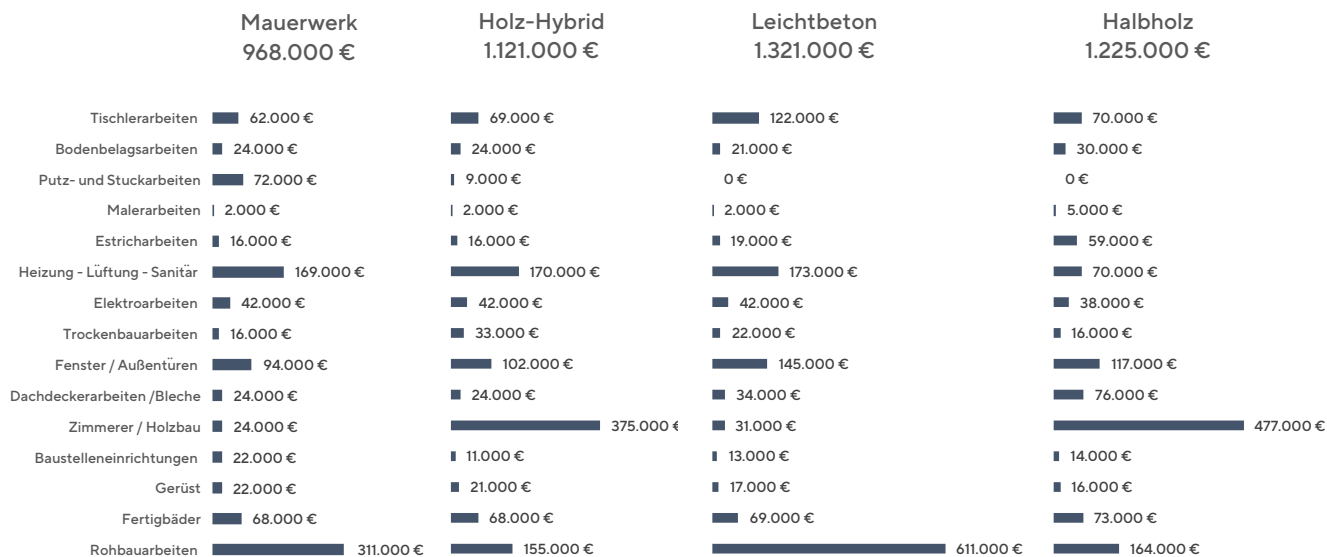


Tabelle 2: Kosten nach Gewerken

Tabelle 2 zeigt, wie sich die Kosten auf die Gewerke verteilen. Die Erfahrungen der ersten drei Forschungshäuser wurden für die Kostenoptimierung von Haus Halbholz genutzt. Die Technik wurde weiter reduziert: Die Bäder haben jetzt Fenster, sodass die Badablufttechnik entfallen kann. Statt in jeder Wohnung das Wasser einzeln per Wärmetauscher zu erwärmen, gibt es jetzt nur noch zwei Wärmetauscher pro Haus, je einen pro Sanitär-Strang. Die Anzahl der Steckdosen wurde reduziert, dafür gibt es Internet in jedem Raum. Auf eine elektrische Klingel an der Wohnungstür wurde verzichtet, man klopft mit der Hand an.

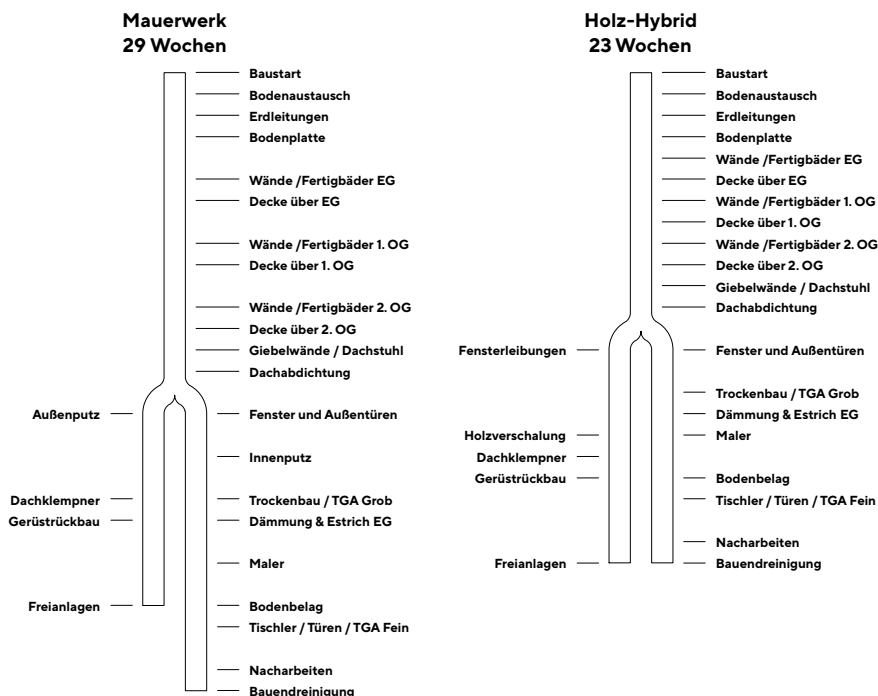


Abbildung 6: Bauzeiten von Haus Mauerwerk und Holz-Hybrid
Quelle: Florian Nagler Architekten und B&O Gruppe

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen die Bauzeiten und die Abfolge der Gewerke, wochenweise dargestellt. Die Gebäude sind so konzipiert, dass die Gewerke nacheinander arbeiten können. Wenn Gewerke parallel arbeiten müssen, wie z.B. bei Leitungsverlegungen (TGA Grob) und Trockenbau, können sie

sich über unterschiedliche Geschossebenen verteilen, müssen sich jedoch abstimmen. Sobald Dach und Fassade dicht sind, können die Arbeiten innen und außen parallel erfolgen. Durch die Gestaltung der Gebäude, bei der die Rohbauelemente, wie Wände und Decken häufig schon die fertige Oberfläche bilden, reduziert sich der Aufwand in der Ausbauphase. Durch die Entflechtung der Abläufe können die Arbeiten ungestört und schnell erfolgen und so enger getaktet werden. Trotzdem können Faktoren den Bauablauf stören. Zimmererarbeiten können beispielsweise bei starkem Regen nicht durchgeführt werden. Auch Material und Personal treffen nicht immer pünktlich auf der Baustelle ein. Die Bauzeit enthält zwar einen Puffer von zwei Wochen für Nacharbeiten, größere Störungen des Bauablaufs führen jedoch zu einer Verschiebung des Fertigstellungstermins.

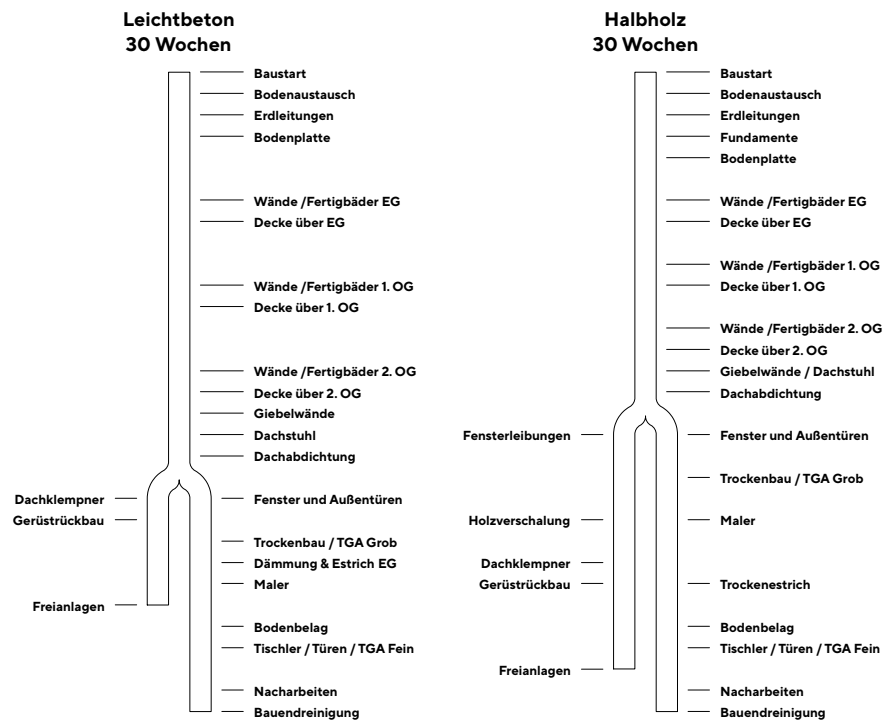


Abbildung 7: Bauzeiten von Haus Leichtbeton und Halbholz
Quelle: Florian Nagler Architekten und B&O Gruppe

Die Forschungshäuser zeigen, dass man mit verschiedenen Baumaterialien wie Mauerwerk, Leichtbeton oder Holz-Hybrid einfach bauen kann. Bei der zweiten Serie, die mit dem Forschungshaus Halbholz begonnen wurde, konnten die Grundrisse verbessert und die Gebäudetechnik vereinfacht werden.

Im Rahmen der Grundlagenforschung an der TU München wurde herausgearbeitet, dass es nicht ausreicht, nur den Bau und die Nutzung zu optimieren. Die Umweltbewertung des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes sollte betrachtet werden – von der Materialgewinnung bis zur Entsorgung oder Weiterverwendung.

V. Methodisches Vorgehen

5.1. Umweltindikatoren und Module

Für die Lebenszyklusanalyse (LCA) wurden die Bilanzierungsregeln des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude (QNG) verwendet. Die QNG-Methodik wird zukünftig von nationalen Förderprogrammen gefordert und auch im Zusammenhang mit Finanzierungen durch Banken verwendet werden.

Diese Untersuchung konzentriert sich auf den Klimawandel. Als Maß für die Klimaerwärmung wird das Globale Erwärmungspotenzial (GWP), ausgedrückt in kg CO₂-Äquivalente, verwendet. Dabei wird die Menge an Treibhausgasen, die zum Treibhauseffekt beitragen, in Bezug auf CO₂-Äquivalente gemessen. Dieser Indikator zeigt an, wie stark das dadurch erzeugte Potenzial die globale Erwärmung beeinflusst.

Tabelle 3: Übersicht der betrachteten Module

| Lebenszyklusphasen | Modulgruppen | Module | hier zu berechnen | |
|---|--------------|------------------------------|-------------------|--------------------|
| Herstellung | A1-A3 | Rohstoffbeschaffung | A1 | X |
| | | Transport | A2 | X |
| | | Produktion | A3 | X |
| Errichtung | A4, A5 | Transport | A4 | |
| | | Errichtung / Einbau | A5 | |
| Betrieb und Nutzung | B1-B7 | Nutzung | B1 | |
| | | Instandhaltung | B2 | |
| | | Instandsetzung / Reparaturen | B3 | |
| | | Austausch | B4 | X |
| | | Modernisierung | B5 | |
| | | Energieverbrauch im Betrieb | B6 | |
| | | Wasserverbrauch im Betrieb | B7 | |
| Rückbau, Abfallbehandlung und Entsorgung | C1-C4 | Rückbau / Abriss | C1 | |
| | | Transport | C2 | |
| | | Abfallbehandlung | C3 | X |
| | | Entsorgung | C4 | X |
| Vorteile & Belastungen außerhalb der Systemgrenze | | Recyclingpotenzial | D1 | separat darstellen |
| | | Effekte exportierter Energie | D2 | |

Der gesamte Lebenszyklus wird chronologisch in Phasen unterteilt, Module genannt. Die Module A1-A3 befassen sich mit der Rohstoffbeschaffung, dem Transport und den Produktionsprozessen während der Herstellung. A4 und A5 decken den Transport zum Bauplatz, sowie die Errichtung und den Einbau vor Ort ab. Die Module B1 bis B7 behandeln die Nutzungsphase, die Module C1 bis C4 umfassen die Entsorgung zum Ende des Lebenszyklus.

Die Auswahl in Tabelle 2 beruht darauf, dass die Errichtungsphase (Module A4-A5) und die ersten Schritte der Entsorgungsphase (Module C1-C2) stark von den individuellen Projektanforderungen abhängen. Allgemeine und zuverlässige Daten hierzu sind nicht ausreichend verfügbar.

Das zusätzliche Modul D beschreibt potenzielle Vor- und Nachteile außerhalb des Lebenszyklus, wenn bestimmte Teile des Gebäudes nach dem Abriss weiterverwendet werden können. Zum Beispiel für Holzwerkstoffe wird in den verwendeten Datensätzen eine hundertprozentige Verbrennung des Altholzes in einem Biomasseheizkraftwerk angesetzt! Es wird weiter angenommen, dass die exportierte Energie thermische Energie aus Erdgas substituiert [Rüter & Diederichs 2012].

Das Ergebnis dieses Moduls wird separat ausgewiesen, da die positiven Effekte des Recyclings zum Teil bereits in der Herstellungsphase berücksichtigt werden und bei einer Addition mehrfach gezählt wären.

5.2. Datengrundlage, Betrachtungszeitraum, Bilanzgrenzen

Gemäß den Regeln des QNG wird die Tabelle „Ökobilanzierung-Rechenwerte 2023_v1-2“ verwendet.

In der Untersuchung wird, entsprechend den Konventionen der Norm, angenommen, dass Gebäude 50 Jahre halten und danach komplett abgerissen werden. Die Bewertung erfolgt nach der Methode „heute gebaut, morgen zurückgebaut“. Für die Bilanzierung des vollständigen Abrisses nach 50 Jahren werden also die Datensätze verwendet, die die heutige Situation wieder spiegeln.

Der Austausch von Gebäudeteilen erfolgt während der 50 Jahre entsprechend der technischen Lebensdauer. Die Datengrundlage für die Anzahl der Austauschzyklen stammt aus der Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“ mit Stand vom 24.02.2017. [BBSR 2017] Die Austauschzyklen für Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung werden durch Tabellen 8 bis 11 der Bilanzierungsregeln des QNG vorgegeben. [BBSR 2023-1]

Die Ökobilanzierung betrachtet die im Gebäude verbauten Baustoffe und Produkte. Die Menge der verbauten Materialien wurde aus dem Gebäudemodell hergeleitet. Zur Strukturierung dieses Mengengerüsts wird die DIN 276 (2018) verwendet, die auch bei Kostenermittlungen zur Anwendung kommt. Die Elemente des Mengengerüsts werden auf dieser Basis in Kostengruppen (KG) unterteilt. Für die Bilanzierung wurden die Mengen folgender Kostengruppen erfasst:

- KG 320 Gründung
- KG 330 Außenwände (inkl. Türen und Fenster)
- KG 340 Innenwände (inkl. Türen und Stützen)
- KG 350 Decken
- KG 360 Dächer
- KG 410 Abwasser- und Wasseranlagen
- KG 420 Wärmeversorgungsanlagen
- KG 430 Raumluftechnische Anlagen

- KG 440 Elektrische Anlagen
- KG 450 Kommunikations-, Sicherheits- und Informationstechnik
- KG 460 Förderanlagen

Die Ergebnisse werden auf die beheizte Raumfläche NRF(R) nach DIN 277 (2016) pro Jahr umgerechnet, um einen Vergleich von Gebäuden unterschiedlicher Größe zu ermöglichen.

Um den Aufwand bei der Erstellung des Mengengerüsts zu reduzieren, werden folgende Bauteile als Sockelbetrag in der Bilanzierung zusammengefasst.

- KG 410: Steig- und Fallrohrleitungen, Anschlussleitungen für Wohnungen und alle Sanitärobjekte
- KG 420 Rohrleitungen, Verteiler für Raumheizflächen, Raumheizflächen
- KG 430 Rohrleitungen, Verteiler, Anschlussleitungen Lüftung
- KG 440 Niederspannungshauptverteiler, Kabel, Leitungen, Unterverteiler
- KG 450 Leerrohre, Kabel, Leitungen, Personenrufanlagen, Lichtruf- und Klingelanlagen, Türsprech- und Türöffneranlagen

Tabelle 4: Sockelbetrag für Bilanzgrößen [BBSR 2023-1] [BBSR 2023-2]

| | Treibhauspotential (GWP) in |
|---|--|
| Sockelbetrag für Bilanzgrößen Module A1-A3, B4, C3 und C4 | Wohngebäude 1,20 Bürogebäude: 1,72 |
| Sockelbetrag für Bilanzgrößen Modul D | Wohngebäude: -0,52 Bürogebäude: -0,86 |

VI. Ergebnisse

6.1. Ergebnisse auf Bauteilebene

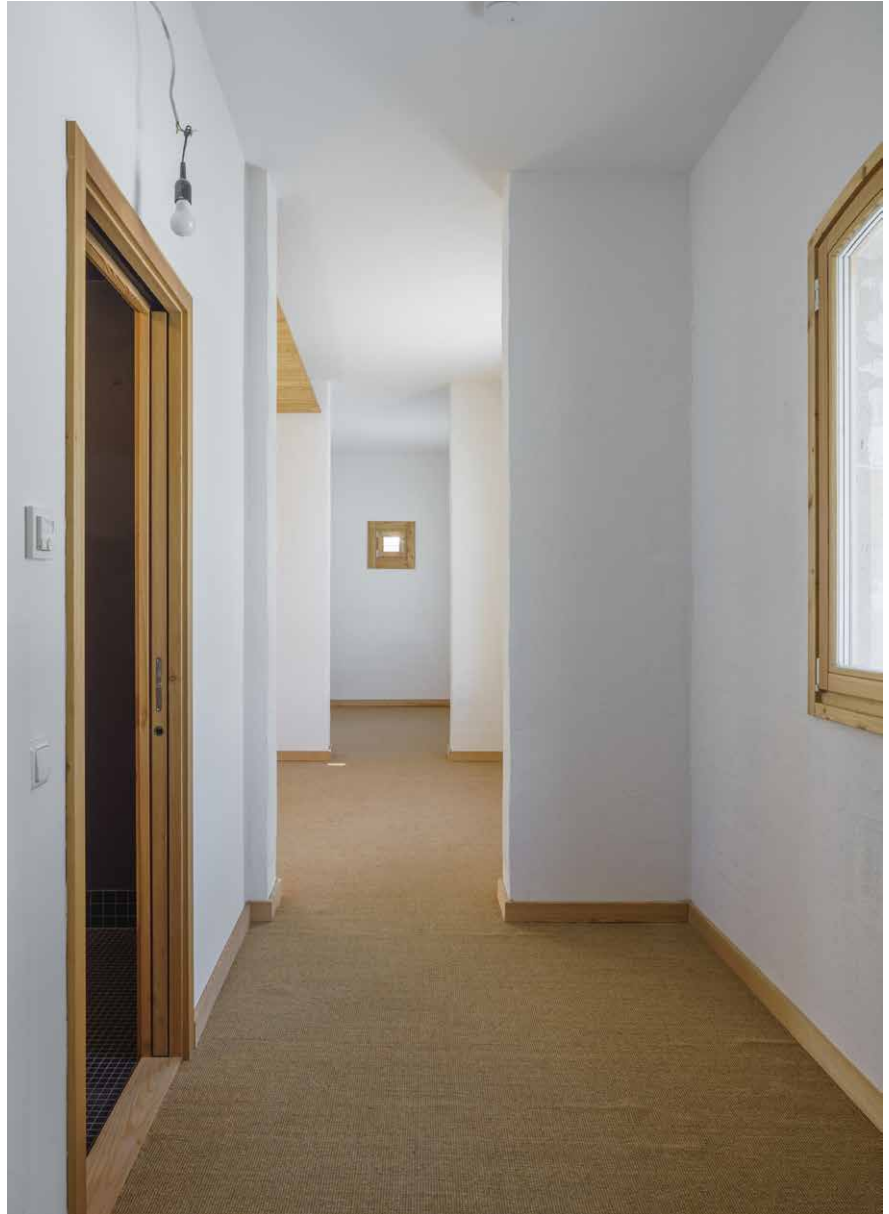
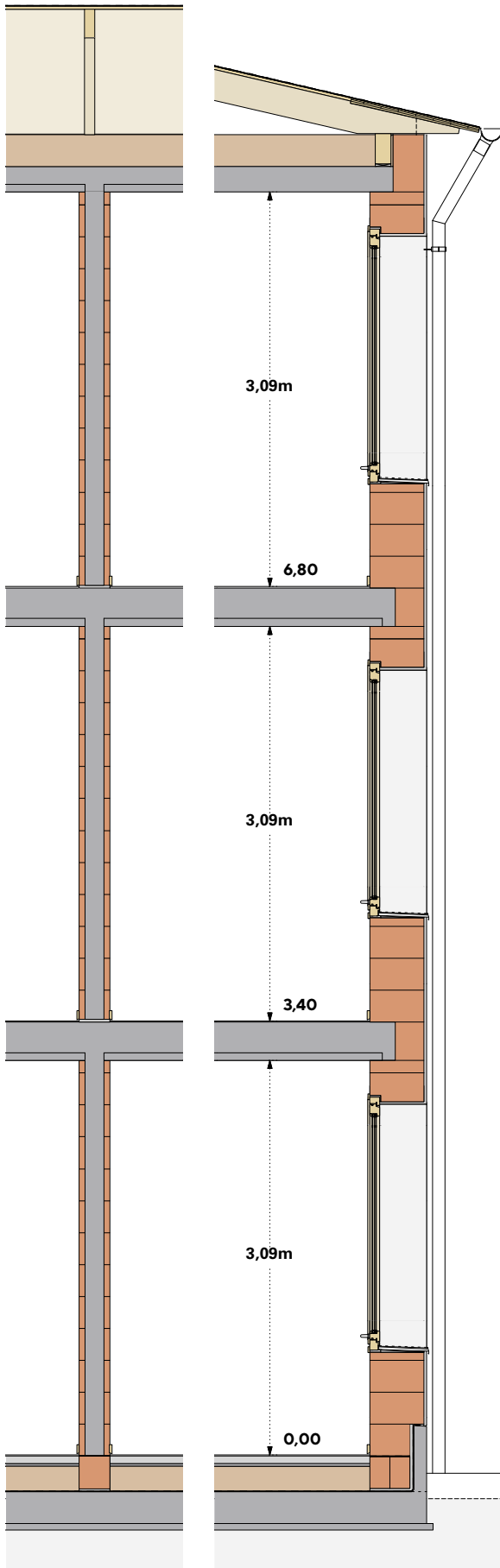


Abbildung 8: Innenansicht Haus Mauerwerk, Foto: Sebastian Schels, pk Odessa

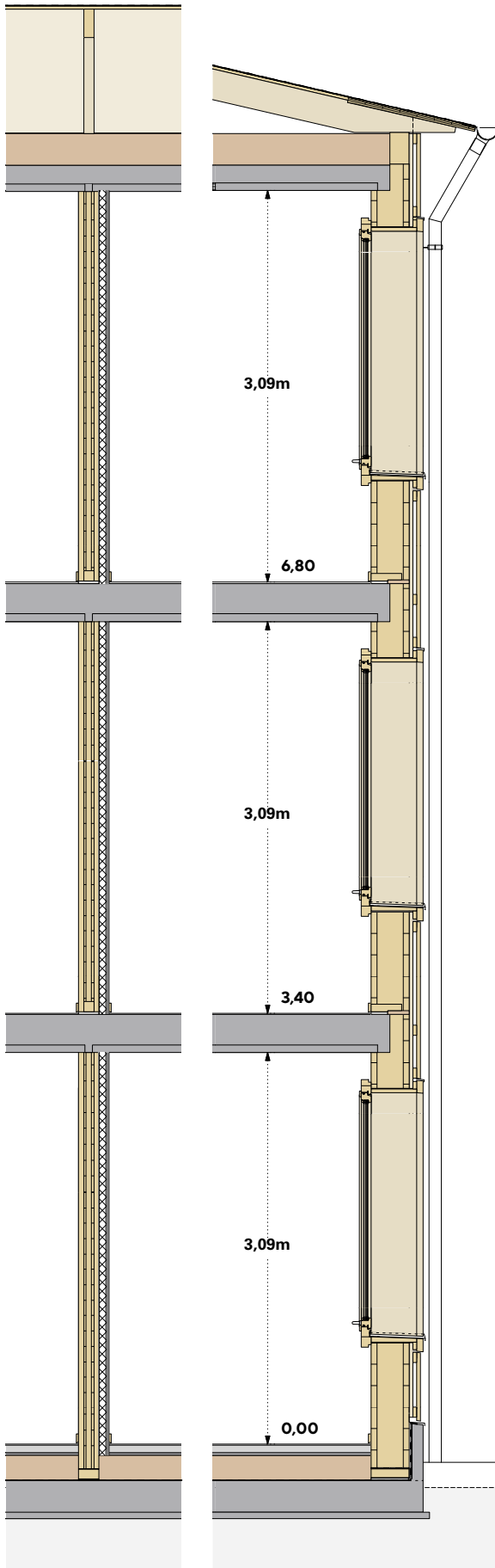


| Bauteile Haus Mauerwerk | Grüne Emission in kgCO ₂ Äq./m ² Bauteil |
|--|--|
| Dach (Decke über 2. OG) | 96,13 |
| Bitumenbahn, beschiefert, 4 mm | 12,88 |
| Bitumenbahn, 4 mm | 12,69 |
| Holzschalung, 24 mm | 1,39 |
| Dachsparren 80/220 mm, e=850 mm, 220 mm | 1,82 |
| Holzfaserdämmstoff, 60 kg/m ³ , 240 mm | 7,82 |
| Beton, als Halbfertigteil mit Aufbeton | 48,56 |
| Bewehrungsstahl 0,7% Volumenanteil, 200 mm | 7,53 |
| Gipsputz, 10 mm | 1,33 |
| Dispersionsfarbe, 0,2 kg/m ² | 2,11 |
| Außenwand | 60,32 |
| Kalkzementleichtputz, 300 kg/m ³ , 20 mm | 2,56 |
| Luftkammerziegel, 425 mm | 54,64 |
| Kalkschlämme, 5 mm | 1,02 |
| Silikatfarbe, 0,2 kg/m ² | 2,11 |
| Holzfenster | 126,38 |
| Lärche, geölt, inkl. Beschläge | 52,82 |
| Isolierverglasung 3-fach | 73,56 |
| Decke über 1. OG / EG | 127,92 |
| Sisal, 3 kg/m ² , ΔL _w ≥ 18 dB, 6 mm | 40,35 |
| Beton, als Halbfertigteil mit Aufbeton | 72,83 |
| Bewehrungsstahl 0,7% Volumenanteil, 300 mm | 11,30 |
| Gipsputz, 10 mm | 1,33 |
| Dispersionsfarbe, 0,2 kg/m ² | 2,11 |
| Innenwand | 100,61 |
| Silikatfarbe, 0,2 kg/m ² | 2,11 |
| Kalkschlämme, 5 mm | 1,02 |
| Verfüllziegel | 65,01 |
| Betonanteil 50%, 240 mm | 29,34 |
| Kalkschlämme, 5 mm | 1,02 |
| Silikatfarbe, 0,2 kg/m ² | 2,11 |
| Bodenplatte | 189,31 |
| Sisal, 3 kg/m ² , 6 mm | 40,35 |
| Zementestrich, 75 mm | 35,74 |
| PE-Folie, 0,2 mm | 0,96 |
| Mineralwolle, 20 mm | 2,75 |
| Holzfaserdämmstoff, 60 kg/m ³ , 180 mm | 5,87 |
| Bitumenbahn, 4 mm | 6,32 |
| Transportbeton C25/30 | 60,69 |
| Bewehrungsstahl 0,7% Volumenanteil, 250 mm | 9,42 |
| Magerbeton, 50 mm, als Sauberkeitsschicht | 12,22 |
| Recyclingschotter, 500 mm | 14,99 |
| Sockel | 34,36 |
| Stahlbeton C25/30 | 24,28 |
| Bewehrungsstahl 0,7% Volumenanteil, 100 mm | 3,77 |
| Bitumenbahn, dahinter hochgezogen, 4 mm | 6,32 |

Abbildung 9: Detailschnitt Haus Mauerwerk, Quelle: Florian Nagler Architekten, TU München



Abbildung 10: Innenansicht Haus Holz-Hybrid, Foto: Sebastian Schels, pk Odessa



Bauteile Haus Holz-Hybrid Graue Emission in kgCO₂Äq./m² Bauteil

| | |
|---|--------------|
| Dach (Decke über 2. OG) | 96,13 |
| Bitumenbahn, beschiefert, 4 mm | 12,88 |
| Bitumenbahn, 4 mm | 12,69 |
| Holzschalung, 24 mm | 1,39 |
| Dachsparren 80/220 mm, e=850 mm, 220 mm | 1,82 |
| Holzfaserdämmstoff, 60 kg/m ³ , 240 mm | 7,82 |
| Beton, als Halbfertigteil mit Aufbeton | 48,56 |
| Bewehrungsstahl 0,7 % Volumenanteil, 200 mm | 7,53 |
| Gipsputz, 10 mm | 1,33 |
| Dispersionsfarbe, 0,2 kg/m ² | 2,11 |

| | |
|---|--------------|
| Außenwand | 53,99 |
| Nadelholz sägerau, | 3,47 |
| Anstrich Vorvergrauung, 0,2 kg/m ² , 30 mm | 9,29 |
| Traglattung 30/80 mm, e=625 mm, 30 mm | 0,44 |
| Konterlattung 30/80 mm, e=625 mm, 30 mm | 0,44 |
| Vollholzwand mit Luftkammern, 300 mm | 40,34 |

| | |
|--------------------------------|---------------|
| Holzfenster | 126,38 |
| Lärche, geölt, inkl. Beschläge | 52,82 |
| Isolierverglasung 3-fach | 73,56 |

| | |
|--|---------------|
| Decke über 1. OG / EG | 127,92 |
| Sisal, 3 kg/m ² , ΔL _w ≥ 18 dB, 6 mm | 40,35 |
| Beton, als Halbfertigteil mit Aufbeton | 72,83 |
| Bewehrungsstahl 0,7 % Volumenanteil, 300 mm | 11,30 |
| Gipsputz, 10 mm | 1,33 |
| Dispersionsfarbe, 0,2 kg/m ² | 2,11 |

| | |
|--------------------------------------|--------------|
| Innenwand | 30,07 |
| Brettsper Holz, 160 mm | 21,51 |
| Gipsplatten, 25 mm auf | 3,00 |
| Walzmetallprofilen e=625 mm | 1,66 |
| dazwischen Mineralwolle 40 mm, 75 mm | 1,77 |
| Gipspachtel, 0,5 mm | 0,02 |
| Silikatfarbe, 0,2 kg/m ² | 2,11 |

| | |
|---|---------------|
| Bodenplatte | 189,31 |
| Sisal, 3 kg/m ² , 6 mm | 40,35 |
| Zementestrich, 75 mm | 35,74 |
| PE-Folie, 0,2 mm | 0,96 |
| Mineralwolle, 20 mm | 2,75 |
| Holzfaserdämmstoff, 60 kg/m ³ , 180 mm | 5,87 |
| Bitumenbahn, 4 mm | 6,32 |
| Transportbeton C25/30 | 60,69 |
| Bewehrungsstahl 0,7 % Volumenanteil, 250 mm | 9,42 |
| Magerbeton, 50 mm, als Sauberkeitsschicht | 12,22 |
| Recyclingschotter, 500 mm | 14,99 |

| | |
|---|--------------|
| Sockel | 34,36 |
| Stahlbeton C25/30 | 24,28 |
| Bewehrungsstahl 0,7 % Volumenanteil, 100 mm | 3,77 |
| Bitumenbahn, dahinter hochgezogen, 4 mm | 6,32 |

Abbildung 11: Detailschnitt Haus Holz-Hybrid, Quelle: Florian Nagler Architekten, TU München

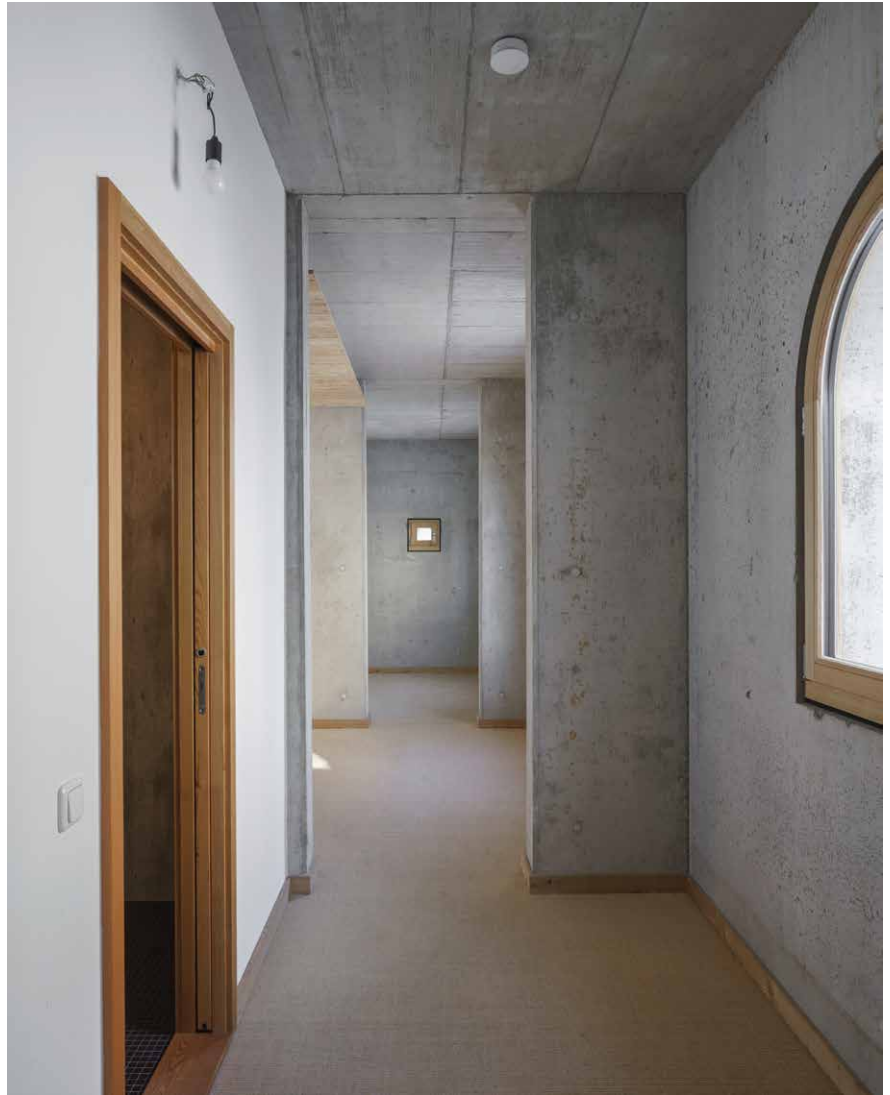
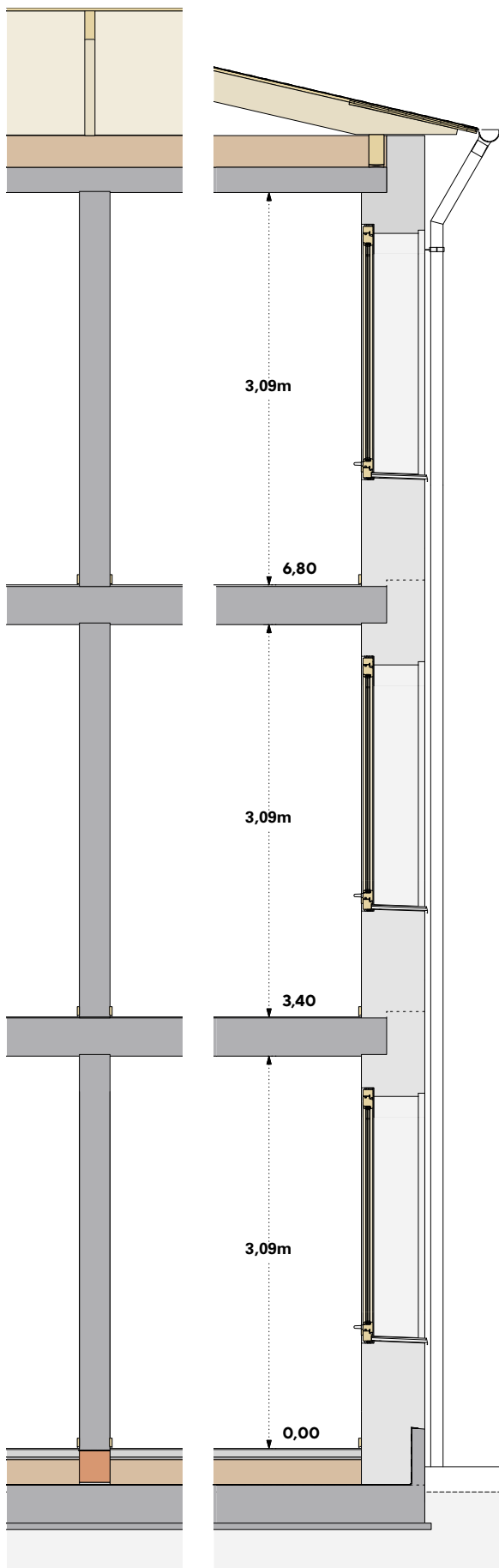


Abbildung 12: Innenansicht Haus Leichtbeton, Foto: Sebastian Schels, pk Odessa



Bauteile Haus Leichtbeton Graue Emission in kgCO₂Äq./m² Bauteil

| | |
|---|--------|
| Dach (Decke über 2. OG) | 90,02 |
| Bitumenbahn, beschiefert, 4 mm | 12,88 |
| Bitumenbahn, 4 mm | 12,69 |
| Holzschalung, 24 mm | 1,39 |
| Dachsparren 80/220 mm, e=850 mm, 220 mm | 1,82 |
| Holzfaserdämmstoff, 60 kg/m ³ , 240 mm | 7,82 |
| Transportbeton C25/30 | 48,68 |
| Stahlfaserbewehrung, 0,44 % Volumenanteil, 200 mm | 4,74 |
| Außenwand | 116,27 |
| Infraleichtbeton, unbewehrt, 750 kg/m ³ , 500 mm | 116,27 |
| Holzfenster | 126,38 |
| Lärche, geölt, inkl. Beschläge | 52,82 |
| Isolierverglasung 3-fach | 73,56 |
| Decke über 1. OG / EG | 120,48 |
| Sisal, 3 kg/m ² , ΔL _w ≥ 18 dB, 6 mm | 40,35 |
| Transportbeton C25/30 | 73,02 |
| Stahlfaserbewehrung, 0,44 % Volumenanteil, 300 mm | 7,10 |
| Innenwand | 58,68 |
| Stahlbeton C25/30, unbewehrt, 240 mm | 58,68 |
| Bodenplatte | 197,83 |
| Sisal, 3 kg/m ² , 6 mm | 40,35 |
| Zementestrich, 75 mm | 35,74 |
| PE-Folie, 0,2 mm | 0,96 |
| Mineralwolle, 20 mm | 2,75 |
| Holzfaserdämmstoff, 60 kg/m ³ , 180 mm | 5,87 |
| Bitumenbahn, 4 mm | 6,32 |
| Stahlbeton C25/30 | 73,02 |
| Bewehrungsstahl 0,44 % Volumenanteil, 300 mm | 7,10 |
| Magerbeton, 50 mm, als Sauberkeitsschicht | 12,22 |
| Recyclingschotter, 450 mm | 13,50 |
| Sockel | 34,36 |
| Transportbeton C25/30 | 24,28 |
| Bewehrungsstahl 0,7 % Volumenanteil, 100 mm | 3,77 |
| Bitumenbahn, dahinter hochgezogen, 4 mm | 6,32 |

Abbildung 13: Detailschnitt Haus Leichtbeton, Quelle: Florian Nagler Architekten, TU München

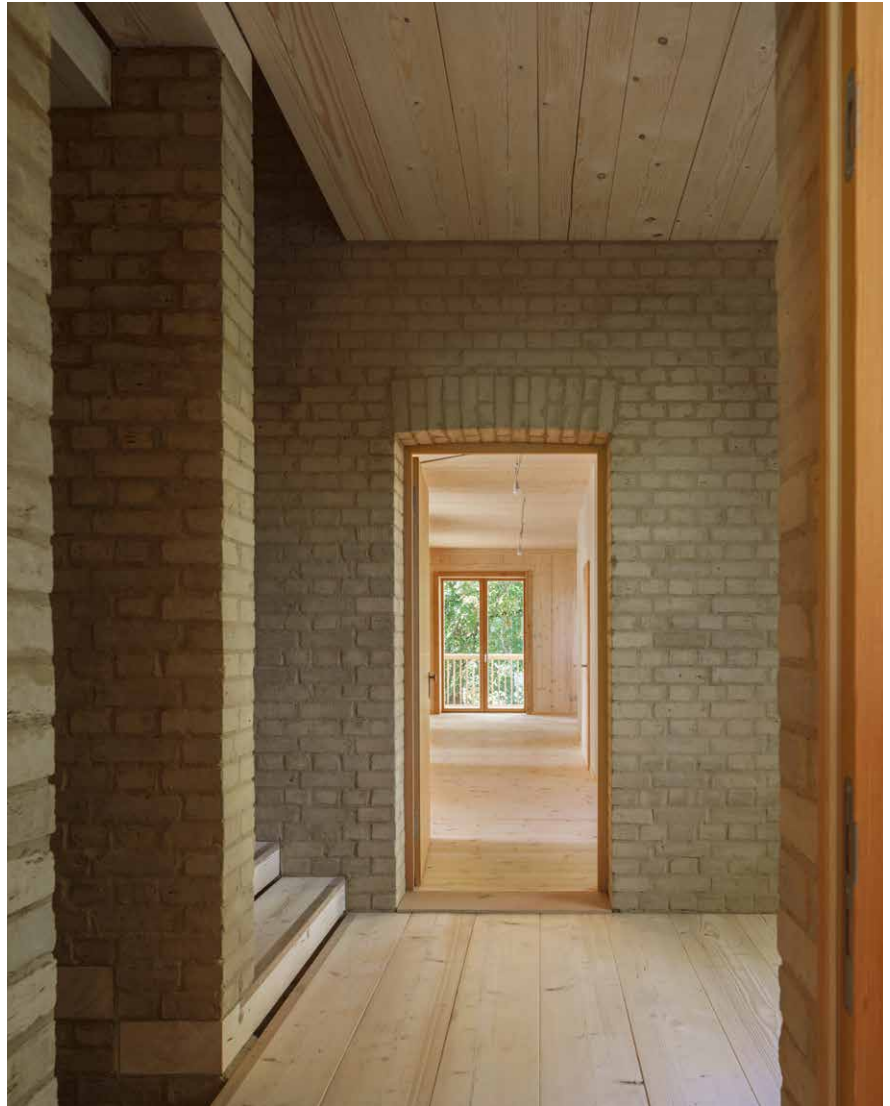


Abbildung 14: Innenansicht Haus Halbholz, Foto: Sebastian Schels, pk Odessa

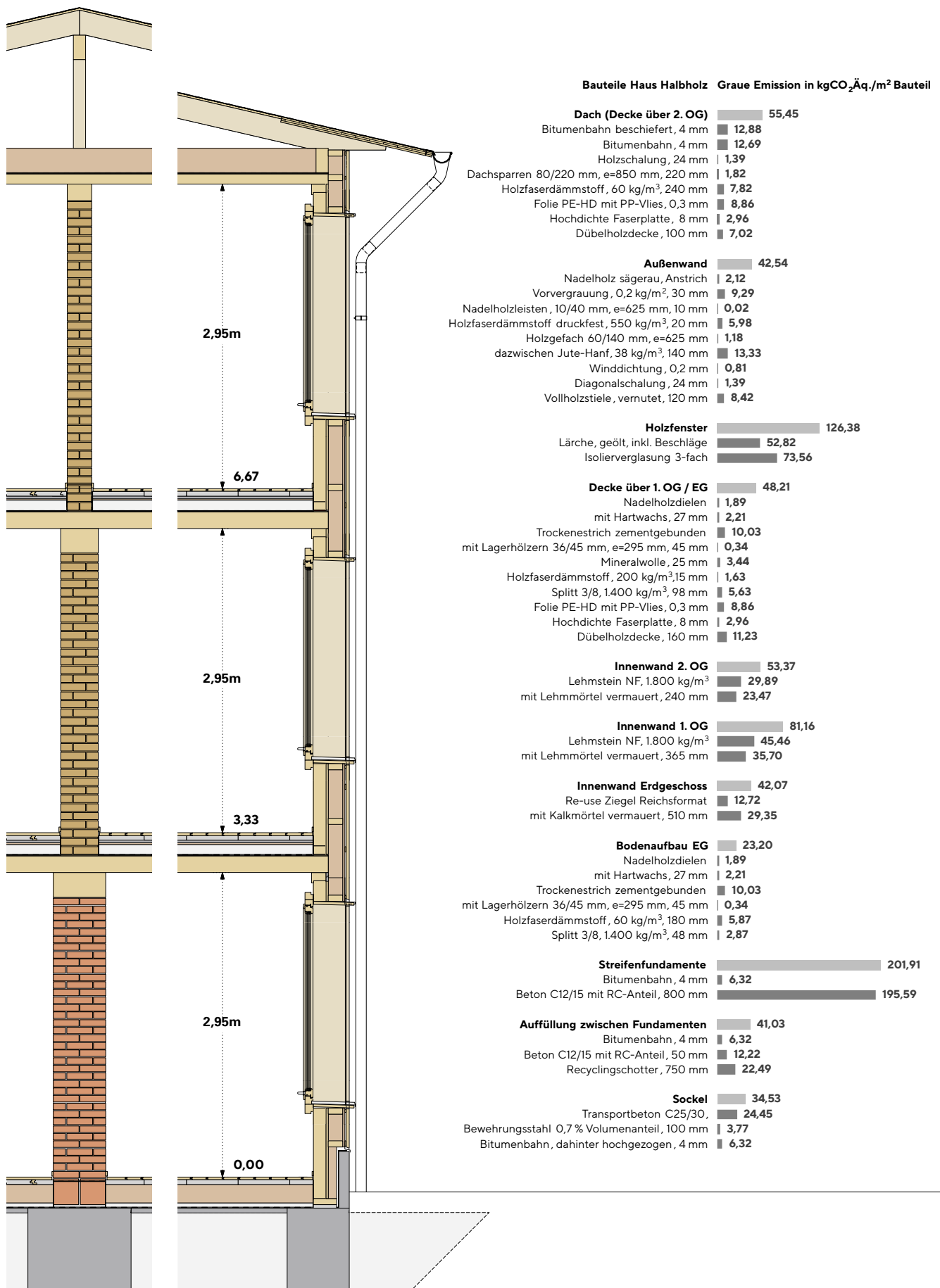


Abbildung 15: Detailschnitt Halbholz, Quelle: Florian Nagler Architekten

Die Abbildungen 9, 11, 13, 15 zeigen die vier Forschungshäuser als Fassadenschnitt, daneben sind die Bauteilschichten und jeweils die Graue Emissionen dargestellt.

Das Haus Leichtbeton weist die geringste Anzahl an Schichten auf. Innen- und Außenwände bestehen hier lediglich aus einem Material. Bei den Häusern Mauerwerk und Holz-Hybrid sind noch zusätzliche Schichten als Witterungsschutz bei den Außenwänden oder als Schallschutz bei den Innenwänden verbaut, wodurch die Bauteilliste entsprechend länger ist.

Das vierte Forschungshaus Halbholz hat die längste Liste von Bauteilschichten. Die Fundamente wurden in Streifenfundamente aufgelöst, um die Menge des eingesetzten Betons zu reduzieren. Die Außenwände sind vielschichtig. Nicht verleimte vertikale Holzprofile tragen die Lasten ab. Darauf folgt eine vernagelte Diagonalschalung aus sägerauen Brettern, die das Bauteil aussteift. Eine Unterspannbahn dient als Winddichtung, gefolgt von einer Dämmung aus Jute-Hanf zwischen Holzprofilen, gehalten von einer druckfesten Holzfaserplatte. Eine auf Abstand montierte senkrechte Schalung aus Fichte dient als Witterungsschutz.

Auch die Geschosdecken haben eine nach Funktionen gegliederte Schichtenabfolge: Mit Holzdübeln verbundene gehobelte Holzprofile tragen die Lasten zu den Innen- und Außenwänden hin ab. Darauf ist eine Hartfaserplatte vernagelt, die die Decke aussteift. Eine Folie darüber erfüllt eine Doppelfunktion als Witterungsschutz während der Bauphase und Rieselschutz für die darauf folgende Schüttung aus Splitt, die zur Schalldämpfung notwendig ist. Auf dem Splitt wurde eine druckfeste Holzfaserplatte gelegt, um die Decke für weitere Arbeitsschritte begehbar zu machen. Es folgt eine Trittschalldämmung aus Mineralwolle und die Traglattung der Nadelholzdiele. Zwischen der Traglattung sind Elemente aus zementgebundenem Basaltsplitt als Trockenestrich verlegt. Dieser hat eine Flächenlast von 75 kg/m^2 und reduziert dadurch die Übertragung von Trittschall.

Trotz der vielschichtigen Konstruktionen bei den Decken und Außenwänden konnte beim Haus Halbholz die Graue Emissionen reduziert werden.

6.2. Ergebnisse auf Gebäudeebene

In Abbildung 16 ist die Graue Emissionen von Bauwerk und Gebäudetechnik der vier Forschungshäuser gegenübergestellt. Die Werte sind nach den Vorgaben des QNG (Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude) auf einen Quadratmeter Nettoraumfläche und Jahr bezogen. In der Wertetabelle werden auch die Teilergebnisse für die Bauteile dargestellt. Das Haus Leichtbeton weist den höchsten Wert auf. Vor allem die Außenwand aus Infralichtbeton erzeugt hohe Graue Emissionen. Das Haus Mauerwerk hat das zweithöchste Ergebnis. Vor allem die Innenwand aus mit Beton verfüllten Ziegeln wirkt sich negativ aus. Das Haus Halbholz erzielt den niedrigsten Wert. Vor allem die Außenwände, Decken und das Dach erzeugen im Vergleich wenig Graue Emissionen.

In Abbildung 17 wird das Recyclingpotenzial dargestellt. In den zugrunde liegenden Datensätzen wird bei Holzwerkstoffen davon ausgegangen, dass diese nach der Abfallbehandlung zur Energiegewinnung genutzt werden.

Dadurch wird der Bilanz der vermiedene Einsatz von fossilen Quellen gutgeschrieben. Das Recyclingpotenzial ist bei Holz-Hybrid und Halbholz deshalb am größten. Beim Haus Halbholz gleicht dieser Wert die Grauen Emissionen sogar nahezu aus.

Graue Emissionen für Herstellung, Austausch, Entsorgung (Module A1-3, B4, C3, C4) bezogen auf Treibhauspotenzial (GWP) in kgCO₂Äq./m²NRF*a (Nettoraumfläche & Jahr), Betrachtungszeitraum 50 Jahre

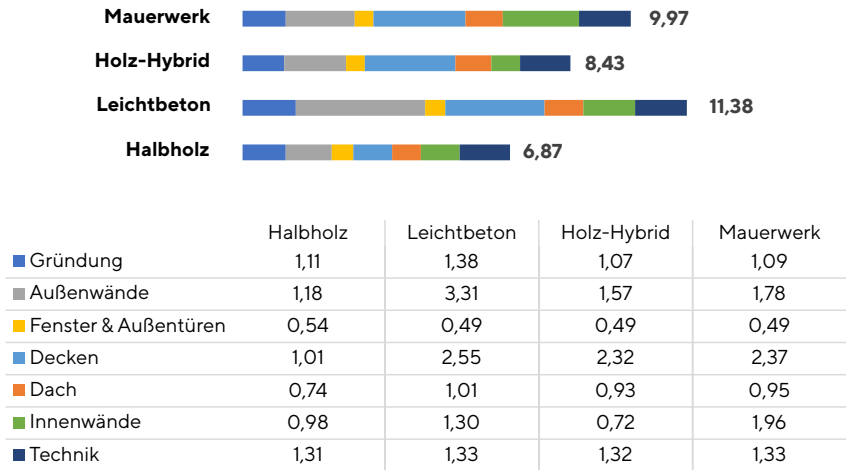


Abbildung 16: Vergleich der vier Forschungshäuser bezüglich Grauer Emissionen für Herstellung, Austausch, Entsorgung (Module A1-3, B4, C3, C4) bezogen auf Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO₂Äq./m²NRF*a (Nettoraumfläche & Jahr), Betrachtungszeitraum 50 Jahre
Quelle: TU München

Recyclingpotenzial (Modul D) bezogen auf Treibhauspotenzial (GWP) in kgCO₂Äq./m²NRF*a (Nettoraumfläche & Jahr) nach 50 Jahren

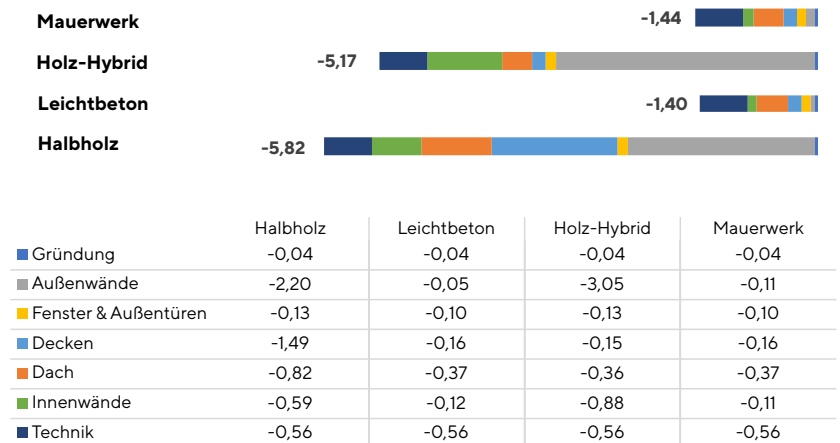


Abbildung 17: Vergleich der vier Forschungshäuser bezüglich Recyclingpotenzial (Modul D) bezogen auf Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO₂Äq./m²NRF*a (Nettoraumfläche & Jahr) nach 50 Jahren,
Quelle: TU München

| | | | |
|--|--------------|-------------|--------------|
| Summe | 1.267.645 | 225.775 | -32.659 |
| Summe /m²NRF | 2.798 | 498 | -72 |
| Summe /m²NRF*a (bei 50 Jahren) | 55,97 | 9,97 | -1,44 |

| Material | Menge in kg | Graue Emissionen in kg CO ₂ Äq. | Recycling-potenzial in kg CO ₂ Äq. | Austausch-zyklen |
|--|--------------|--|---|------------------|
| Transportbeton C20/25 | 645.780 | 66.901 | -1.326 | - |
| Mauerziegel | 144.940 | 32.405 | -1.771 | - |
| Sockelbetrag Technik | keine Angabe | 27.180 | -11.778 | keine Angabe |
| Verfüllziegel | 79.272 | 23.859 | -163 | - |
| Sisalbelag | 756 | 10.169 | -1.194 | 4,0 |
| Bewehrungsstahl | 11.454 | 7.827 | 0 | - |
| Schotter 16/32 | 299.250 | 6.410 | -615 | - |
| Dreifachverglasung (Dicke: 3,6 cm) | 1.548 | 6.326 | -145 | 1,0 |
| Zementestrich | 23.940 | 4.753 | 0 | - |
| Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest | 414 | 4.361 | -18 | 3,0 |
| Bitumenbahnen PYE PV 200 S5 (ungeschiefert) | 1.587 | 3.515 | 0 | 1,0 |
| Bitumenbahnen PYE-PV 200 S5 ns (geschiefert) | 1.807 | 3.414 | 0 | 1,0 |
| Holz-Blendrahmen | 855 | 2.337 | -1.034 | 0,6 |
| Holz-Flügelrahmen | 795 | 2.303 | -954 | 0,6 |
| Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren | 4.144 | 2.251 | -3.408 | - |
| Keramische Fliesen und Platten | 2.434 | 1.728 | -7 | - |
| Pufferspeicher (Stahl) | 150 | 1.724 | -642 | 2,0 |
| Bitumenbahnen G 200 S4 (Dicke 4 mm) | 1.491 | 1.712 | 0 | 1,0 |
| Kalkzement Putzmörtel | 3.898 | 1.662 | 0 | 1,0 |
| Fenster-Beschlag für Drehkipfenster | 98 | 1.464 | -950 | 1,0 |
| Betonfertigteil Treppe | 8.733 | 1.452 | -17 | - |
| Kalk-Innenputz | 6.066 | 1.376 | 0 | - |
| Gipskartonplatte (imprägniert) | 7.660 | 1.358 | 0 | - |
| Stahl Feinblech bandverzinkt | 374 | 1.001 | -590 | - |
| Übergabestation Fernwärme | 100 | 997 | -246 | 1,0 |
| Feuerverzinkte Baustähle | 448 | 828 | -457 | - |
| Gipsputz | 4.905 | 724 | 0 | - |
| 3- und 5-Schicht Massivholzplatte | 1.899 | 717 | -1.151 | 0,2 |
| Furnersperrholz | 1.424 | 637 | -432 | - |
| Konstruktionsvollholz | 3.526 | 629 | -2.514 | - |
| Gipsfaserplatte | 1.480 | 494 | 0 | - |
| Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung) | 312 | 492 | 0 | - |
| Brettsperrholz | 1.762 | 484 | -1.102 | - |
| Edelstahlblech | 133 | 455 | -88 | - |
| Hanfvlies | 148 | 410 | -47 | - |
| Mineralwolle (Boden-Dämmung) | 226 | 366 | 0 | - |
| Nadelschnittholz - getrocknet | 2.354 | 281 | -1.698 | - |
| Linoleum | 465 | 158 | -207 | 2,0 |
| PU-Dämmplatten aus Blockschaumstoff | 24 | 142 | -24 | - |
| Dampfbremse PE (Dicke 0,2 mm) | 28 | 133 | -38 | - |
| Lüfter dezentral (Wand & Decke) 60 m ³ /h | 7 | 130 | -33 | 2,0 |
| Fenstergriff | 6 | 124 | -11 | 0,7 |
| Betonpflaster- Standardstein grau mit Vorsatz | 540 | 62 | -1 | - |
| Splitt 2/15 (getrocknet) | 312 | 13 | -1 | - |
| Kleber für Gipsplatten | 103 | 12 | 0 | - |

Tabelle 5: Ergebnisse Haus Mauerwerk, LCA aufgeteilt nach Materialien

| | | | |
|---------------------------------------|--------------|-------------|--------------|
| Summe | 1.057,364 | 195,040 | -119,644 |
| Summe /m2NRF | 2,284 | 421 | -258 |
| Summe /m2NRF*a (bei 50 Jahren) | 45,67 | 8,43 | -5,17 |

| Material | Menge in kg | Graue | Recycling- | Austausch- |
|---|--------------|---------------------------|---------------------------|--------------|
| | | Emissionen | potenzial | |
| | | in kg CO ₂ Äq. | in kg CO ₂ Äq. | zyklen |
| Transportbeton C20/25 | 541.845 | 56.134 | -1.113 | - |
| Brettsperrholz | 115.951 | 31.856 | -72.495 | - |
| Sockelbetrag Technik | keine Angabe | 27.780 | -12.038 | keine Angabe |
| Sisalbelag | 756 | 10.169 | -1.194 | 4,0 |
| Bewehrungsstahl | 11.454 | 7.827 | 0 | - |
| Schotter 16/32 | 299.250 | 6.410 | -615 | - |
| Dreifachverglasung (Dicke: 3,6 cm) | 1.548 | 6.326 | -145 | 1,0 |
| Lasur Holzaußenwände | 123 | 5.705 | -417 | 12,0 |
| Zementestrich | 23.940 | 4.753 | 0 | - |
| Bitumenbahnen PYE PV 200 S5 (ungeschiefert) | 1.587 | 3.515 | 0 | 1,0 |
| Bitumenbahnen PYE-PV 200 S5 ns (geschiefert) | 1.807 | 3.414 | 0 | 1,0 |
| Nadelschnittholz - getrocknet | 13.596 | 2.961 | -17.893 | 0,8 |
| Holz-Blendrahmen | 855 | 2.337 | -1.034 | 0,6 |
| Holz-Flügelrahmen | 795 | 2.303 | -954 | 0,6 |
| Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren | 4.144 | 2.251 | -3.408 | - |
| Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest | 185 | 1.949 | -8 | 3,0 |
| Keramische Fliesen und Platten | 2.434 | 1.728 | -7 | - |
| Pufferspeicher (Stahl) | 150 | 1.724 | -642 | 2,0 |
| Bitumenbahnen G 200 S4 | 1.491 | 1.712 | 0 | 1,0 |
| Gipskartonplatte (imprägniert) | 9.220 | 1.635 | 0 | - |
| Stahl Feinblech bandverzinkt | 549 | 1.469 | -865 | - |
| Fenster-Beschlag für Drehkipfenster | 98 | 1.464 | -950 | 1,0 |
| Betonfertigteil Treppe | 8.733 | 1.452 | -17 | - |
| 3- und 5-Schicht Massivholzplatte | 2.511 | 1.108 | -1.778 | 0,4 |
| Übergabestation Fernwärme | 100 | 997 | -246 | 1,0 |
| Feuerverzinkte Baustähle | 448 | 828 | -457 | - |
| Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung) | 476 | 751 | 0 | - |
| Gipsputz | 4.905 | 724 | 0 | - |
| Furniersperrholz | 1.424 | 637 | -432 | - |
| Konstruktionsvollholz | 3.492 | 623 | -2.489 | - |
| Gipsfaserplatte | 1.480 | 494 | 0 | - |
| Edelstahlblech | 133 | 455 | -88 | - |
| Hanfvlies | 148 | 410 | -47 | - |
| Mineralwolle (Boden-Dämmung) | 226 | 366 | 0 | - |
| Linoleum | 465 | 158 | -207 | 2,0 |
| PU-Dämmplatten aus Blockschaumstoff | 24 | 142 | -24 | - |
| Dampfbremse PE | 28 | 133 | -38 | - |
| Lüfter dezentral (Wand & Decke) 60 m³/h | 7 | 130 | -33 | 2,0 |
| Fenstergriff | 6 | 124 | -11 | 0,7 |
| Betonpflaster- Standardstein grau mit Vorsatz | 540 | 62 | -1 | - |
| Kleber für Gipsplatten | 130 | 15 | 0 | - |
| Splitt 2/15 (getrocknet) | 312 | 13 | -1 | - |

Tabelle 6: Ergebnisse Haus Holz-Hybrid, LCA aufgeteilt nach Materialien

| | | | |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Summe | 1.364.055 | 253.162 | -31.198 |
| Summe /m2NRF | 3.065 | 569 | -70 |
| Summe /m2NRF*a (bei 50 Jahren) | 61,31 | 11,38 | -1,40 |

| Material | Menge in kg | Graue | Recycling- | Austausch- |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | Emissionen | potenzial | |
| | | in kg CO2Äq. | in kg CO2Äq. | |
| Infralichtbeton | 223.050 | 69.159 | -457 | - |
| Transportbeton C30/37 | 509.162 | 64.495 | -1.046 | - |
| Transportbeton C20/25 | 270.004 | 27.972 | -555 | - |
| Sockelbetrag Technik | keine Angabe | 26.700 | -11.570 | keine Angabe |
| Sisalbelag | 756 | 10.169 | -1.194 | 4,0 |
| Dreifachverglasung | 1.548 | 6.326 | -145 | 1,0 |
| Schotter 16/32 | 282.450 | 6.050 | -580 | - |
| Bewehrungsstahl | 7.679 | 5.247 | 0 | - |
| Zementestrich | 23.940 | 4.753 | 0 | - |
| Bitumenbahnen PYE PV 200 S5 (ungeschiefert) | 1.587 | 3.515 | 0 | 1,0 |
| Bitumenbahnen PYE-PV 200 S5 ns (geschiefert) | 1.807 | 3.414 | 0 | 1,0 |
| Holz-Blendrahmen | 855 | 2.337 | -1.034 | 0,6 |
| Holz-Flügelrahmen | 795 | 2.303 | -954 | 0,6 |
| Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren | 4.144 | 2.251 | -3.408 | - |
| Keramische Fliesen und Platten | 2.434 | 1.728 | -7 | - |
| Pufferspeicher (Stahl) | 150 | 1.724 | -642 | 2,0 |
| Bitumenbahnen G 200 S4 | 1.491 | 1.712 | 0 | 1,0 |
| Fenster-Beschlag für Drehkippenster | 98 | 1.464 | -950 | 1,0 |
| Betonfertigteil Treppe | 8.733 | 1.452 | -17 | - |
| Gipskartonplatte (imprägniert) | 7.660 | 1.358 | 0 | - |
| Stahl Feinblech bandverzinkt | 374 | 1.001 | -590 | - |
| Übergabestation Fernwärme | 100 | 997 | -246 | 1,0 |
| Feuerverzinkte Baustähle | 448 | 828 | -457 | - |
| 3- und 5-Schicht Massivholzplatte | 1.899 | 717 | -1.151 | 0,2 |
| Furniersperrholz | 1.424 | 637 | -432 | - |
| Konstruktionsvollholz | 3.526 | 629 | -2.514 | - |
| Gipsfaserplatte | 1.480 | 494 | 0 | - |
| Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung) | 312 | 492 | 0 | - |
| Brettsperrholz | 1.762 | 484 | -1.102 | - |
| Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest | 45 | 470 | -2 | 3,0 |
| Edelstahlblech | 133 | 455 | -88 | - |
| Hanfvlies | 148 | 410 | -47 | - |
| Mineralwolle | 226 | 366 | 0 | - |
| Nadelschnittholz - getrocknet | 2.354 | 281 | -1.698 | - |
| Linoleum | 465 | 158 | -207 | 2,0 |
| PU-Dämmplatten aus Blockschaumstoff | 24 | 142 | -24 | - |
| Dampfbremse PE | 28 | 133 | -38 | - |
| Lüfter dezentral (Wand & Decke) 60 m³/h | 7 | 130 | -33 | 2,0 |
| Fenstergriff | 6 | 124 | -11 | 0,7 |
| Betonpflaster | 540 | 62 | -1 | - |
| Splitt 2/15 (getrocknet) | 312 | 13 | -1 | - |
| Kleber für Gipsplatten | 103 | 12 | 0 | - |

Tabelle 7: Ergebnisse Haus Leichtbeton, LCA aufgeteilt nach Materialien

| | | | |
|---------------------------------------|--------------|-------------|--------------|
| Summe | 916.931 | 167.644 | -142.101 |
| Summe /m2NRF | 1.879 | 344 | -291 |
| Summe /m2NRF*a (bei 50 Jahren) | 37,58 | 6,87 | -5,82 |

| Material | Menge in kg | Graue Emissionen in kg CO2Äq. | Recyclingpotenzial in kg CO2Äq. | Austauschzyklen |
|---|--------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Sockelbetrag Technik | keine Angabe | 29.280 | -12.688 | keine Angabe |
| Transportbeton C20/25 | 198.361 | 20.550 | -407 | - |
| Hobelware | 82.091 | 11.867 | -60.138 | - |
| Lehmstein | 96.994 | 7.896 | -142 | - |
| Hanfvlies | 2.761 | 7.654 | -872 | - |
| Dreifachverglasung | 1.818 | 7.429 | -170 | 1,0 |
| Lacksysteme Holzaußenwände halb-pigmentiert | 144 | 6.693 | -489 | 12,0 |
| Schotter 16/32 | 306.600 | 6.568 | -630 | - |
| Lehmpulver | 17.592 | 6.200 | -26 | - |
| Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren | 11.297 | 6.137 | -9.292 | - |
| Folie PE-HD mit PP-Vlies zur Abdichtung | 797 | 4.935 | -1.343 | - |
| Beton-Mauersteine | 35.518 | 4.543 | -73 | - |
| Bitumenbahnen PYE-PV 200 S5 ns (geschiefert) | 1.910 | 3.607 | 0 | 1,0 |
| Bitumenbahnen PYE PV 200 S5 (ungeschiefert) | 1.605 | 3.554 | 0 | 1,0 |
| Nadelschnittholz - getrocknet | 20.900 | 3.159 | -19.087 | 0,3 |
| Dachbahnen EPDM (Dicke 1,5 mm) | 198 | 3.049 | -671 | 1,0 |
| Holz-Blendrahmen | 1.129 | 2.962 | -1.310 | 0,5 |
| Holz-Flügelrahmen | 1.052 | 2.921 | -1.210 | 0,5 |
| Feuerverzinkte Baustähle | 1.426 | 2.634 | -1.454 | - |
| 3- und 5-Schicht Massivholzplatte | 6.046 | 2.310 | -3.708 | 0,2 |
| Splitt 2/15 (getrocknet) | 51.131 | 2.096 | -105 | - |
| Fenster-Beschlag für Drehkipfenster | 124 | 1.857 | -1.205 | 1,0 |
| Bitumenbahnen G 200 S4 | 1.562 | 1.794 | 0 | 1,0 |
| Konstruktionsvollholz | 9.298 | 1.765 | -7.051 | 0,1 |
| Pufferspeicher (Stahl) | 150 | 1.724 | -642 | 2,0 |
| Hochdichte Faserplatte | 3.502 | 1.527 | -444 | - |
| Keramische Fliesen und Platten | 1.790 | 1.271 | -5 | - |
| Nadelschnittholz - frisch | 10.809 | 1.130 | -11.428 | 1,0 |
| Wasserlack | 49,83 | 1.000 | -84 | 6,0 |
| Übergabestation Fernwärme | 100 | 997 | -246 | 1,0 |
| Mineralwolle (Boden-Dämmung) | 614 | 994 | 0 | - |
| Furniersperrholz | 2.162 | 967 | -656 | - |
| Kalkzement Putzmörtel | 4.269 | 910 | 0 | - |
| Balkenschichtholz | 2.467 | 775 | -1.982 | 0,2 |
| Brettsperrholz | 2.056 | 565 | -1.285 | - |
| Stahl Feinblech bandverzinkt | 188 | 504 | -297 | - |
| Edelstahlblech | 143 | 489 | -95 | - |
| Unterspannbahn PP | 88 | 435 | -97 | - |
| Entsorgung Bauschutt Recyclingbaustoffe | 24.189 | 394 | 0 | - |
| Baustroh | 4.177 | 393 | -2.631 | - |
| Gipsfaserplatte | 960 | 320 | 0 | - |
| Betonpflaster- Standardstein grau mit Vorsatz | 2.430 | 278 | -4 | - |
| Bewehrungsstahl | 383 | 262 | 0 | - |
| Gipskartonplatte (imprägniert) | 1.440 | 255 | 0 | - |
| Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung) | 151 | 239 | 0 | - |
| Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest | 19 | 202 | -1 | 3,0 |
| Lehmputz | 1.809 | 193 | -8 | - |
| Fenstergriff | 8 | 152 | -14 | 0,7 |
| XPS-Dämmstoff | 20 | 137 | -32 | - |
| Natursteinplatte, hart, Außenbereich | 832 | 29 | -2 | - |
| Laubschnittholz - getrocknet | 101 | 16 | -74 | - |
| Sand 0/2 getrocknet | 297 | 12 | -1 | - |
| Lehmbauplatte | 1.344 | 9 | -2 | - |
| Kleber für Gipsplatten | 30 | 3 | 0 | - |

Tabelle 8: Ergebnisse Haus Halbholz, LCA aufgeteilt nach Materialien

In den Tabellen 5 – 8 sind die Ergebnisse der Ökobilanz (LCA) für die vier Forschungshäuser nach Materialien unterteilt aufgelistet. Für jedes Material sind das Gewicht, die Grauen Emissionen, das Recyclingpotenzial und die Austauschzyklen angegeben. Im Kopf sind die Werte pro Haus aufsummiert. Zur besseren Vergleichbarkeit untereinander und mit anderen Projekten sind die Ergebnisse auch pro Nettoraumfläche angegeben. Darunter ist auch der

Kennwert nach QNG ermittelt, der das Ergebnis pro Nettoraumfläche und Jahr angibt. Dies ermöglicht eine Gegenüberstellung der Bilanz von Bauwerk und Technik mit Ökobilanzen aus der Nutzung von Raumwärme und Strom, da diese üblicherweise auch pro Nettoraumfläche und Jahr angegeben werden.

Die Materialien in Tabellen 5 – 8 wurden nach Grauer Energie in absteigender Reihenfolge sortiert. Bei den ersten drei Forschungshäusern aus Mauerwerk, Holz-Hybrid und Leichtbeton finden sich die Materialien, aus denen die Decken und Wände bestehen, jeweils ganz oben in der Liste, gefolgt vom Sockelbetrag für die Haustechnik. Beim vierten Forschungshaus, dem Haus Halbholz, wird die Tabelle von der Technik und dem im Fundament eingesetzten Beton angeführt. Erst danach ordnen sich die Hobelware und der Lehmstein ein, die für die Decken und Wände verwendet wurden. Als Bodenbelag wurden Holzdielen verwendet.

Einige Materialien werden abhängig von der Einbausituation im Verlauf des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren mehrmals ausgetauscht und gehen somit mehrfach in die Bilanz ein [BBSR 2017]. Dieser mehrfache Austausch erfolgt unter anderem bei Bodenbelägen, Anstrichen, Abdichtungen, Fenstern und Gebäudetechnik.

6.3. Fazit und Ausblick

Die ersten drei Forschungshäuser in Bad Aibling, gebaut in monolithischen Bauweisen aus Mauerwerk, Holz-Hybrid und Leichtbeton, erzielten in der Ökobilanz von Bauwerk und Technik mit Werten zwischen 8 – 12 kg CO₂Äq./2NRF*a überdurchschnittlich gute Ergebnisse. Dreigeschossige Mehrfamilienhäuser weisen üblicherweise Werte von 16 – 18 kg CO₂Äq./2NRF*a auf [Lennerts et al. 2021].

Das vierte Forschungshaus, Haus Halbholz, erreicht mit 7 kg CO₂Äq./2NRF*a sogar einen noch etwas besseren Wert, indem der Einsatz von Beton reduziert und durch andere Materialien substituiert wurde. Für die Innenwände wurden beim Haus Halbholz Lehmstein und wiederverwendete Ziegel eingesetzt. Die Gestaltung der Forschungshäuser mit Satteldächern, Fenstern geschützt durch tiefe Laibungen und robusten, alterungsfähigen Oberflächen zeigt in der Betrachtung der Ökobilanz von Bauwerk und Technik gute Ergebnisse.

Die Ökobilanzierung über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes kann einen Beitrag dazu leisten, die notwendige Diskussion über nachhaltiges Bauen zu versachlichen und konkrete Optimierungspotenziale aufzuzeigen. Vor diesem Hintergrund sollen auch die folgenden Forschungshäuser noch weiter optimiert werden.

Beim Haus Holzrahmen ist geplant, den Vorfertigungsgrad weiter zu erhöhen. Der Brandschutzstandard und das statische System sollen dabei so ausgelegt werden, dass damit Gebäude bis an die Hochhausgrenze möglich wären. Gleichzeitig sollen erhöhte Schallschutzanforderungen umgesetzt werden, um die Bauweise auch für den Bau von Eigentumswohnungen im Geschosswohnungsbau interessant zu machen.

Das Haus Vollholz verfolgt das Ziel, die Grauen Emissionen noch weiter zu reduzieren und trotzdem sehr einfach konstruiert zu sein. Als Innenwände sollen vorgefertigte Stampflehmelemente eingesetzt werden.

Für die Fundamente beider Häuser sollen Betonplatten verwendet werden, die aus dem Abbruch einer nahegelegenen Werkhalle gewonnen wurden (siehe Abbildung 18). Der aktuelle Stand der Planung von Haus Holzrahmen und Vollholz ist in den Abbildungen 19 und 20 dargestellt. Die Ökobilanzen sind in Tabelle 9 und 10 aufgeführt. Trotz der Umsetzung von erhöhtem Brandschutz und Schallschutz liegt das Ergebnis von Haus Holzrahmen unter $8 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2\text{NRF}^*\text{a}$. Das Ergebnis des Haus Vollholz sogar unter $6 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2\text{NRF}^*\text{a}$. Der Baubeginn der Forschungshäuser Holzrahmen und Vollholz ist für 2024 und 2025 geplant.

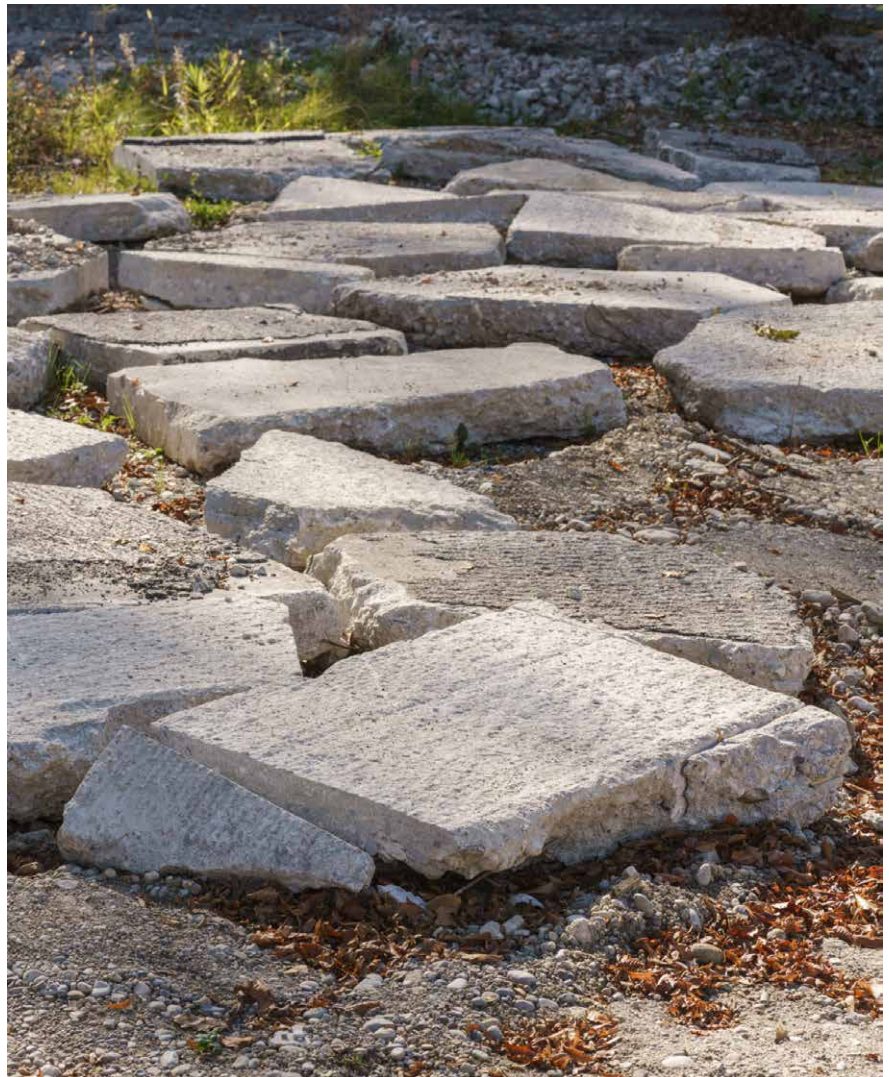


Abbildung 18: Betonplatten, die ehemals einen Werkhallenboden bildeten sollen als Fundamente für die geplanten Forschungshäuser Holzrahmen und Vollholz dienen
Foto: Sebastian Schels, pk Odessa

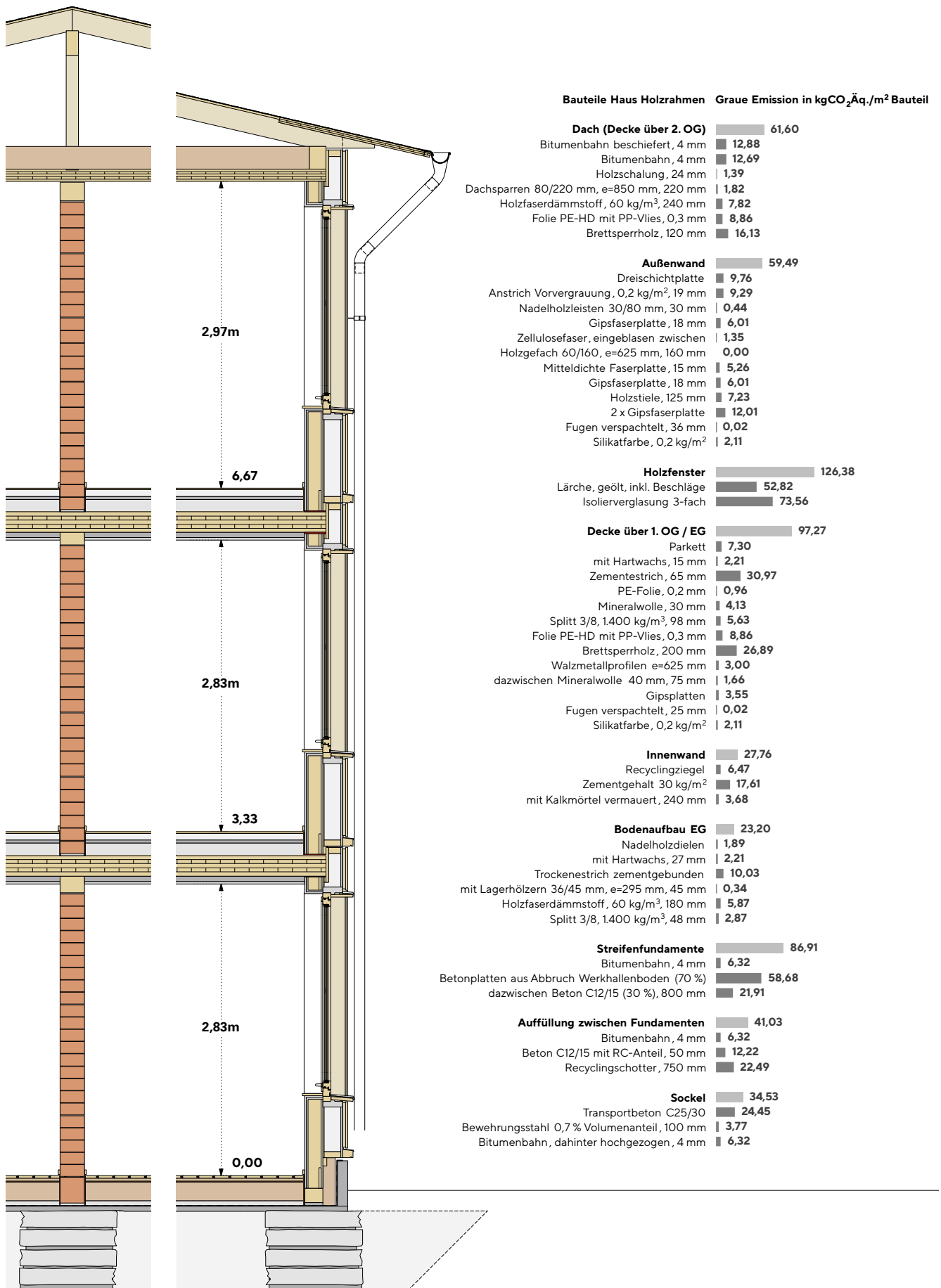
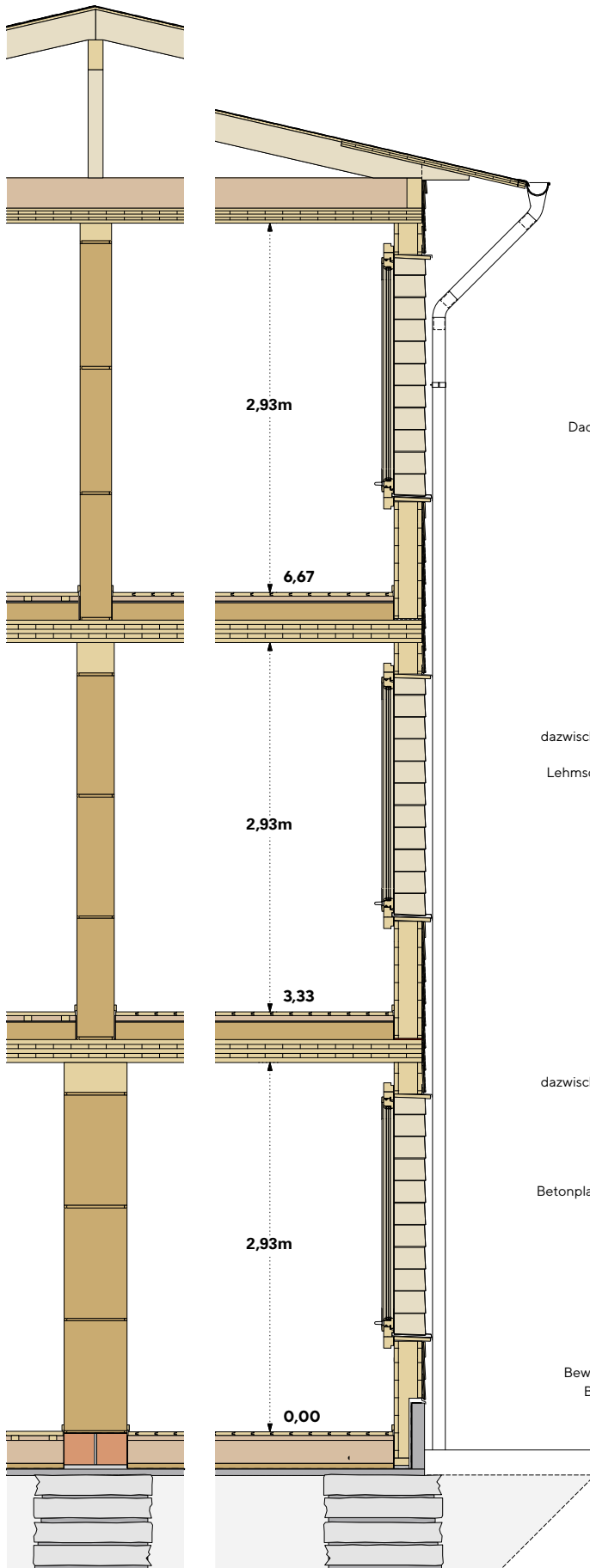


Abbildung 19: Detailschnitt Haus Holzrahmen, Quelle: Florian Nagler Architekten



| Bauteile Haus Vollholz | | Graue Emission in kgCO ₂ Äq./m ² Bauteil |
|---|-------|--|
| Dach (Decke über 2. OG) 61,60 | | |
| Bitumenbahn beschiefert, 4 mm | 12,88 | |
| Bitumenbahn, 4 mm | 12,69 | |
| Holzschalung, 24 mm | 1,39 | |
| Dachsparren 80/220 mm, e=850 mm, 220 mm | 1,82 | |
| Holzfaserdämmstoff, 60 kg/m ³ , 240 mm | 7,82 | |
| Folie PE-HD mit PP-Vlies, 0,3 mm | 8,86 | |
| Brettsperrholz, 120 mm | 16,13 | |
| Außenwand 30,39 | | |
| Holzschindeln, gespalten, 25 mm | 0,81 | |
| Vollholz mit Luftkammern, 220 mm | 29,58 | |
| Holzfenster 126,38 | | |
| Lärche, geölt, inkl. Beschläge | 52,82 | |
| Isolierverglasung 3-fach | 73,56 | |
| Decke über 1. OG / EG 42,14 | | |
| Nadelholzdielen | 1,89 | |
| mit Hartwachs, 27 mm | 2,21 | |
| Lagerhölzern 40/60 mm, e=300 mm | 0,46 | |
| dazwischen Holzfaserdämmstoff, 60 kg/m ³ , 40 mm | 1,04 | |
| Hanfvlies, 10 mm | 1,05 | |
| Lehmschüttung, verdichtet, 2.000 kg/m ³ , 150 mm | 2,42 | |
| Folie PE-HD mit PP-Vlies, 0,3 mm | 8,86 | |
| Brettsperrholz, 180 mm | 24,20 | |
| Innenwand 2. OG 4,03 | | |
| Stampflehm, 2.000 kg/m ³ , 250 mm | 4,03 | |
| Innenwand 1. OG 4,83 | | |
| Stampflehm, 2.000 kg/m ³ , 300 mm | 4,83 | |
| Innenwand EG 8,05 | | |
| Stampflehm, 2.000 kg/m ³ , 500 mm | 8,05 | |
| Bodenplatte 12,28 | | |
| Nadelholzdielen | 1,89 | |
| mit Hartwachs, 27 mm | 2,21 | |
| Lagerhölzern 40/60 mm, e=300 mm | 0,46 | |
| dazwischen Holzfaserdämmstoff, 60 kg/m ³ , 40 mm | 1,04 | |
| Holzfaserdämmstoff, 60 kg/m ³ , 180 mm | 5,87 | |
| Lehmschüttung, 2.000 kg/m ³ , 50 mm | 0,81 | |
| Streifenfundamente 86,91 | | |
| Bitumenbahn, 4 mm | 6,32 | |
| Betonplatten aus Abbruch Werkhallenboden (70 %) | 58,68 | |
| dazwischen Beton C12/15 (30 %), 800 mm | 21,91 | |
| Auffüllung zwischen Fundamenten 41,03 | | |
| Bitumenbahn, 4 mm | 6,32 | |
| Beton C12/15 mit RC-Anteil, 50 mm | 12,22 | |
| Recyclingschotter, 750 mm | 22,49 | |
| Sockel 34,53 | | |
| Transportbeton C25/30 | 24,45 | |
| Bewehrungsstahl 0,7 % Volumenanteil, 100 mm | 3,77 | |
| Bitumenbahn, dahinter hochgezogen, 4 mm | 6,32 | |

Abbildung 20: Detailschnitt Haus Vollholz, Quelle: Florian Nagler Architekten

| | | | |
|---------------------------------------|--------------|-------------|--------------|
| Summe | 983.691 | 178.397 | -130.074 |
| Summe /m2NRF | 2.049 | 372 | -271 |
| Summe /m2NRF*a (bei 50 Jahren) | 40,99 | 7,43 | -5,42 |

| Material | Menge in kg | Graue Emissionen in kg CO2Äq. | Recycling-potenzial in kg CO2Äq. | Austausch-zyklen |
|---|--------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------|
| Sockelbetrag Technik | keine Angabe | 28.800 | -12.480 | keine Angabe |
| Brettspertholz | 55.734 | 15.312 | -34.846 | - |
| Gipsfaserplatte | 39.408 | 13.147 | 0 | - |
| Transportbeton C20/25 | 102.970 | 10.667 | -211 | - |
| Zementestrich | 45.084 | 8.952 | 0 | - |
| 3- und 5-Schicht Massivholzplatte | 16.276 | 8.831 | -14.172 | 0,7 |
| Dreifachverglasung | 1.818 | 7.429 | -170 | 1,0 |
| Lasur Holzaußenwände | 144 | 6.693 | -489 | 12,0 |
| Schotter 16/32 | 268.800 | 5.758 | -552 | - |
| Nadelschnittholz - getrocknet | 43.295 | 5.714 | -34.523 | 0,1 |
| Folie PE-HD mit PP-Vlies zur Abdichtung | 797 | 4.935 | -1.343 | - |
| Zement Mittelwert Deutschland | 8.370 | 4.913 | 0 | - |
| Entsorgung Bauschutt Recyclingbaustoffe | 274.653 | 4.478 | 0 | - |
| Bitumenbahnen PYE-PV 200 S5 ns (geschiefert) | 1.910 | 3.607 | 0 | 1,0 |
| Bitumenbahnen PYE PV 200 S5 (ungeschiefert) | 1.605 | 3.554 | 0 | 1,0 |
| Dachbahnen EPDM | 198 | 3.049 | -671 | 1,0 |
| Holz-Blendrahmen | 1.129 | 2.962 | -1.310 | 0,5 |
| Holz-Flügelrahmen | 1.052 | 2.921 | -1.210 | 0,5 |
| Mitteldichte Faserplatte | 5.907 | 2.811 | -640 | - |
| Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren | 4.871 | 2.646 | -4.006 | - |
| Feuerverzinkte Baustähle | 1.426 | 2.634 | -1.454 | - |
| Massivholzparkett | 3.384 | 2.110 | -2.582 | - |
| Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff | 3.476 | 1.986 | -2.356 | - |
| Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest | 184 | 1.938 | -8 | 3,0 |
| Bitumenbahnen G 200 S4 | 1.661 | 1.908 | 0 | 1,0 |
| Fenster-Beschlag für Drehkippenster | 124 | 1.857 | -1.205 | 1,0 |
| Konstruktionsvollholz | 9.803 | 1.855 | -7.411 | 0,1 |
| Pufferspeicher (Stahl) | 150 | 1.724 | -642 | 2,0 |
| Splitt 2/15 (getrocknet) | 39.651 | 1.626 | -81 | - |
| Stahl Feinblech bandverzinkt | 512 | 1.370 | -807 | - |
| Gipskartonplatte (imprägniert) | 7.220 | 1.280 | 0 | - |
| Keramische Fliesen und Platten | 1.790 | 1.271 | -5 | - |
| Mineralwolle (Boden-Dämmung) | 737 | 1.192 | 0 | - |
| Kalkzement Putzmörtel | 4.821 | 1.028 | 0 | - |
| Wasserlack | 50 | 1.000 | -84 | 6,0 |
| Übergabestation Fernwärme | 100 | 997 | -246 | 1,0 |
| Furnierspertholz | 2.162 | 967 | -656 | - |
| Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung) | 455 | 718 | 0 | - |
| Hanfvlies | 193 | 535 | -61 | - |
| Balkenschichtholz | 1.449 | 513 | -1.312 | 0,4 |
| Edelstahlblech | 143 | 489 | -95 | - |
| Baustroh | 4.177 | 393 | -2.631 | - |
| Hobelware | 2.149 | 311 | -1.574 | - |
| Betonpflaster- Standardstein grau mit Vorsatz | 2.430 | 278 | -4 | - |
| Dampfbremse PE | 58 | 276 | -79 | - |
| Bewehrungsstahl | 383 | 262 | 0 | - |
| Lehmputz | 1.809 | 193 | -8 | - |
| Fenstergriff | 8 | 152 | -14 | 0,7 |
| XPS-Dämmstoff | 20 | 137 | -32 | - |
| Stampflehmwand | 16.400 | 132 | -24 | - |
| Natursteinplatte, hart, Außenbereich | 832 | 29 | -2 | - |
| Kleber für Gipsplatten | 174.416 | 21 | 0 | - |
| Laubschnittholz - getrocknet | 101 | 16 | -74 | - |
| Sand 0/2 getrocknet | 297 | 12 | -1 | - |
| Lehmbauplatte | 1.344 | 9 | -2 | - |

Tabelle 9: Ergebnisse Haus Holzrahmen, LCA aufgeteilt nach Materialien

| | | | |
|---------------------------------------|--------------|-------------|--------------|
| Summe | 986.187 | 137.493 | -131.285 |
| Summe /m2NRF | 1.953 | 272 | -260 |
| Summe /m2NRF*a (bei 50 Jahren) | 39,06 | 5,45 | -5,20 |

| Material | Menge in kg | Graue Emissionen in kg CO2Äq. | Recycling- potenzial in kg CO2Äq. | Austausch- zyklen |
|---|--------------|----------------------------------|---|----------------------|
| Sockelbetrag Technik | keine Angabe | 30.300 | -13.130 | keine Angabe |
| Brettsper Holz | 110.029 | 30.229 | -68.793 | - |
| Transportbeton C20/25 | 102.970 | 10.667 | -211 | - |
| Dreifachverglasung | 1.818 | 7.429 | -170 | 1,0 |
| Schotter 16/32 | 268.800 | 5.758 | -552 | - |
| Folie PE-HD mit PP-Vlies zur Abdichtung | 797 | 4.935 | -1.343 | - |
| Bitumenbahnen PYE-PV 200 S5 ns (geschiefert) | 1.910 | 3.607 | 0 | 1,0 |
| Bitumenbahnen PYE PV 200 S5 (ungeschiefert) | 1.605 | 3.554 | 0 | 1,0 |
| Dachbahnen EPDM | 198 | 3.049 | -671 | 1,0 |
| Holz-Blendrahmen | 1.129 | 2.962 | -1.310 | 0,5 |
| Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren | 5.426 | 2.948 | -4.463 | - |
| Holz-Flügelrahmen | 1.052 | 2.921 | -1.210 | 0,5 |
| Entsorgung Bauschutt Recyclingbaustoffe | 163.968 | 2.673 | 0 | - |
| Feuerverzinkte Baustähle | 1.426 | 2.634 | -1.454 | - |
| Stampflehmwand | 261.200 | 2.103 | -384 | - |
| 3- und 5-Schicht Massivholzplatte | 5.564 | 2.003 | -3.214 | 0,1 |
| Nadelschnittholz - getrocknet | 12.639 | 1.935 | -11.694 | 0,3 |
| Bitumenbahnen G 200 S4 | 1.661 | 1.908 | 0 | 1,0 |
| Fenster-Beschlag für Drehkipfenster | 124 | 1.857 | -1.205 | 1,0 |
| Pufferspeicher (Stahl) | 150 | 1.724 | -642 | 2,0 |
| Keramische Fliesen und Platten | 1.790 | 1.271 | -5 | - |
| Konstruktionsvollholz | 5.760 | 1.134 | -4.529 | 0,1 |
| Wasserlack | 50 | 1.000 | -84 | 6,0 |
| Übergabestation Fernwärme | 100 | 997 | -246 | 1,0 |
| Furniersper Holz | 2.162 | 967 | -656 | - |
| Hobelware | 5.936 | 858 | -4.349 | - |
| Hanfvlies | 303 | 839 | -96 | - |
| Balkenschichtholz | 2.366 | 749 | -1.916 | 0,2 |
| Nadelschnittholz - frisch | 10.920 | 571 | -5.773 | - |
| Stahl Feinblech bandverzinkt | 188 | 504 | -297 | - |
| Edelstahlblech | 137 | 468 | -91 | - |
| Lacksysteme Holzaußenwände halb-pigmentiert | 9 | 437 | -32 | 12,0 |
| Baustroh | 4.177 | 393 | -2.631 | - |
| Gipsfaserplatte | 960 | 320 | 0 | - |
| Betonpflaster- Standardstein grau mit Vorsatz | 2.430 | 278 | -4 | - |
| Bewehrungsstahl | 383 | 262 | 0 | - |
| Gipskartonplatte (imprägniert) | 1.440 | 255 | 0 | - |
| Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung) | 151 | 239 | 0 | - |
| Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest | 19 | 202 | -1 | 3,0 |
| Lehmputz | 1.809 | 193 | -8 | - |
| Fenstergriff | 8 | 152 | -14 | 0,7 |
| XPS-Dämmstoff | 20 | 137 | -32 | - |
| Natursteinplatte, hart, Außenbereich | 832 | 29 | -2 | - |
| Laubschnittholz - getrocknet | 101 | 16 | -74 | - |
| Sand 0/2 getrocknet | 297 | 12 | -1 | - |
| Lehmbauplatte | 1.344 | 9 | -2 | - |
| Kleber für Gipsplatten | 30 | 3 | 0 | - |

Tabelle 10: Ergebnisse Haus Vollholz, LCA aufgeteilt nach Materialien

VII. Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Flächen und Baukosten | 12 |
| Tabelle 2: Kosten nach Gewerken | 13 |
| Tabelle 3: Übersicht der betrachteten Module | 15 |
| Tabelle 4: Sockelbetrag für Bilanzgrößen [BBSR 2023-1] [BBSR 2023-2] | 17 |
| Tabelle 5: Ergebnisse Haus Mauerwerk, LCA aufgeteilt nach Materialien | 28 |
| Tabelle 6: Ergebnisse Haus Holz-Hybrid, LCA aufgeteilt nach Materialien | 29 |
| Tabelle 7: Ergebnisse Haus Leichtbeton, LCA aufgeteilt nach Materialien | 30 |
| Tabelle 8: Ergebnisse Haus Halbholz, LCA aufgeteilt nach Materialien | 31 |
| Tabelle 9: Ergebnisse Haus Holzrahmen, LCA aufgeteilt nach Materialien | 36 |
| Tabelle 10: Ergebnisse Haus Vollholz, LCA aufgeteilt nach Materialien | 37 |

VIII. Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Die Forschungshäuser im Bau, Foto: Max Kratzer | 8 |
| Abbildung 2: Lageplan der Forschungshäuser mit Angaben zu Material und Baujahr, Quelle: Florian Nagler Architekten | 10 |
| Abbildung 3: Blick in den Hof, links Mauerwerk, rechts Holz-Hybrid Foto: Sebastian Schels, pk Odessa | 10 |
| Abbildung 4: Haus „Halbholz“, das vierte Forschungshaus Foto: Sebastian Schels, pk Odessa | 11 |
| Abbildung 5: Gegenüberstellung der Grundrisse der Häuser Mauerwerk und Halbholz, Quelle: Florian Nagler Architekten | 12 |
| Abbildung 6: Bauzeiten von Haus Mauerwerk und Holz-Hybrid Quelle: Florian Nagler Architekten und B&O Gruppe | 13 |
| Abbildung 7: Bauzeiten von Haus Leichtbeton und Halbholz Quelle: Florian Nagler Architekten und B&O Gruppe | 14 |
| Abbildung 8: Innenansicht Haus Mauerwerk Foto: Sebastian Schels, pk Odessa | 18 |
| Abbildung 9: Detailschnitt Haus Mauerwerk Quelle: Florian Nagler Architekten, TU München | 19 |
| Abbildung 10: Innenansicht Haus Holz-Hybrid Foto: Sebastian Schels, pk Odessa | 20 |
| Abbildung 11: Detailschnitt Haus Holz-Hybrid Quelle: Florian Nagler Architekten, TU München | 21 |
| Abbildung 12: Innenansicht Haus Leichtbeton Foto: Sebastian Schels, pk Odessa | 22 |
| Abbildung 13: Detailschnitt Haus Leichtbeton Quelle: Florian Nagler Architekten, TU München | 23 |
| Abbildung 14: Innenansicht Haus Halbholz Foto: Sebastian Schels, pk Odessa | 24 |
| Abbildung 15: Detailschnitt Halbholz Quelle: Florian Nagler Architekten | 25 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 16: Vergleich der vier Forschungshäuser bezüglich Grauer Emissionen für Herstellung, Austausch, Entsorgung (Module A1-3, B4, C3, C4) bezogen auf Treibhauspotenzial (GWP) in $\text{kg CO}_2\text{-Äq./m}^2\text{NRF}^*\text{a}$ (Nettoraumfläche & Jahr), Betrachtungszeitraum 50 Jahre Quelle: TU München | 27 |
| Abbildung 17: Vergleich der vier Forschungshäuser bezüglich Recyclingpotenzial (Modul D) bezogen auf Treibhauspotential (GWP) in $\text{kg CO}_2\text{-Äq./m}^2\text{NRF}^*\text{a}$ (Nettoraumfläche & Jahr) nach 50 Jahren, Quelle: TU München | 27 |
| Abbildung 18: Betonplatten, die ehemals einen Werkhallenboden bildeten sollen als Fundamente für die geplanten Forschungshäuser Holzrahmen und Vollholz dienen Foto: Sebastian Schels, pk Odessa | 33 |
| Abbildung 19: Detailschnitt Haus Holzrahmen Quelle: Florian Nagler Architekten | 34 |
| Abbildung 20: Detailschnitt Haus Vollholz Quelle: Florian Nagler Architekten | 35 |

IX. Literaturverzeichnis

BBSR (2017) Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) [online]. Berlin: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Download: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf

BBSR (2023-1) Anhang 3.1.1 zur ANLAGE 3, Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude, Stand 01.03.2023 [online]. Berlin: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Download: https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG_Handbuch_Anlage-3_Anhang-311_LCA_Bilanzregeln-WNG_v1-3.pdf

BBSR (2023-2) Anhang 3.2.1.1 zur ANLAGE 3, Bilanzierungsregeln des QNG für Nichtwohngebäude, Stand 01.03.2023 [online]. Berlin: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Download: https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG_Handbuch_Anlage-3_Anhang-3211_LCA_Bilanzregeln-NW_v1-3.pdf

Franke, L.; Niemann, A.; Varga, Z.; Kränkel, T.; Jarmer, T.; Auer, T.; Nagler, F. (2023): Einfach Bauen 3 – Messen, Validieren, Rückkoppeln: Monitoring der Pilothäuser aus Massivholz, Leichtbeton und hochwärmedämmendem Mauerwerk aus Einfach Bauen 2 (SWD-10.08.18.7-18.32) und Validierung der Ergebnisse. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Download: https://www.einfach-bauen.net/wp-content/uploads/2023/09/01-EINFACH-BAUEN-3_Endbericht-mit-Anlage-A1-und-A2.pdf

Jarmer, T.; Niemann, A.; Franke, L.; Varga, Z.; Diwald, F.; Nagler, F.; Auer, T. (2021) Einfach Bauen 2: Planen, Bauen, Messen – Anwendung integraler Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen mit Holz, Leichtbeton und hochwärmedämmendem Mauerwerk. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Download: https://www.einfach-bauen.net/wp-content/uploads/2021/07/210726_EINFACH-BAUEN-2_Endbericht_für-TUM_gr.pdf

Lennerts, K., Kropp, T., Zak, J., Fisch, M. N., Wilken, T., Kley, C., & Marx, S. (2021). Verantwortung übernehmen – Der Gebäudebereich auf dem Weg zur Klimaneutralität. Berlin: Zentraler Immobilienausschuss e. V. (ZIA). Download: <https://zia-deutschland.de/wp-content/uploads/2021/12/Verantwortung-uebernehmen-Gutachten.pdf>

Nagler, F.; Jarmer, T.; Niemann, A.; Cruel, A.; Auer, T.; Franke, L.; Kaufmann, H.; Winter, S.; Ott, S.; Krechel, M.; Gehlen, C.; Thiel, C. (2019) Einfach Bauen – Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen – Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. Download: <https://www.einfach-bauen.net/wp-content/uploads/2019/04/einfach-bauen-schlussbericht.pdf>

Rüter, S.; Diederichs, S. (2012). ARBEITSBERICHT Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Hamburg: Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg. Download: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn050490.pdf



Impressum

Ansprechpartner bei der Technischen Universität München
und dem Bayerischen Bauindustrieverband:

Technische Universität München
School of Engineering and Design
Department of Architecture
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Autor/innen

Dr. Tilmann Jarmer
tilmann.jarmer@tum.de
+49 89 289-23881

Industriepartner

B&O Bau GmbH
Dietrich-Bonhoeffer-Str. 14
83043 Bad Aibling
buo.de/bau

Abteilung Projektplattform Energie + Innovation

Dipl.-Ing. Sandro Haseloff, CREA®
s.haseloff@ppe.tum.de
+49 89 289-28153

M.Sc. Irina Kaiser
i.kaiser@ppe.tum.de

Abteilung Hochbau und Energie

Dipl.-Ing. (FH)/MBA & Eng. Werner Goller
w.goller@bauindustrie-bayern.de
+49 89 235003-41



Dank

Das Projekt wurde von der Bayerischen Bauwirtschaft gefördert.

Gestaltung

Dipl.-Des. (FH) Daniel Schwaiger

Herausgeber

Bayerischer Bauindustrieverband e.V. (BBIV)
Oberanger 32 | 80331 München
www.bauindustrie-bayern.de

Verlag

Technische Universität München
TUM School of Engineering and Design
Arcisstr. 21
80333 München
www.ed.tum.de, kommunikation@ed.tum.de

ISBN 978-3-948278-48-9
© BBIV, 1. Auflage, August 2024

