

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 Gebäude-technik einzuregeln. 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 vieres 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 Klimaanlagen 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 Infraleichtbeton. 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 Materialen 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 nahekamen, 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 Klimaanlagen 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 einflossen. 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, der Energieverbrauch sowie der 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

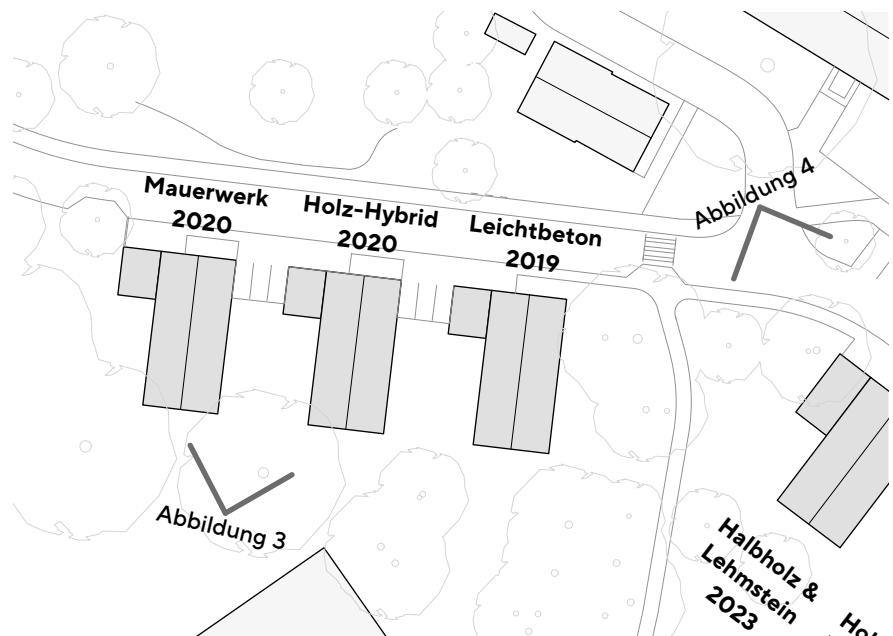


Abbildung 2: Lageplan der Forschungshäuser mit Angaben zu Material und Baujahr
Quelle: Florian Nagler Architekten



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 vierter Forschungshaus ist 2023 fertiggestellt worden. Die Außenwände von Haus 4 bestehen aus vertikalen Vollholzstieln 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 IV 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 weitere Häuser dienen.



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

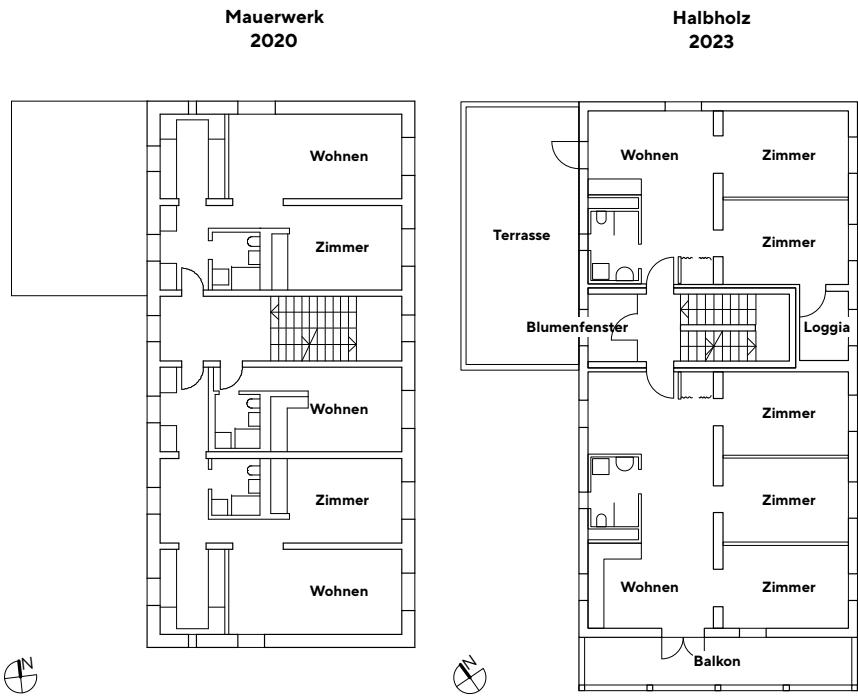


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Grundrisse der Häuser Mauerwerk und Halbholz
Quelle: Florian Nagler Architekten

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 Treppenhaus 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 ange rechnet 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

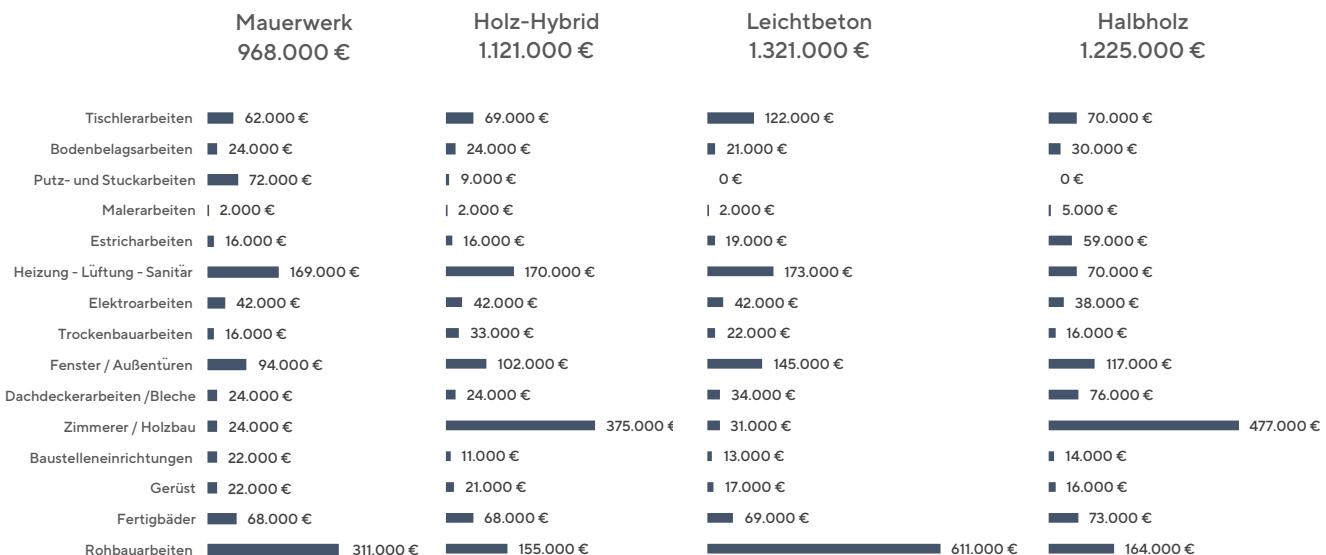


Tabelle 2: Kosten nach Gewerken

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.

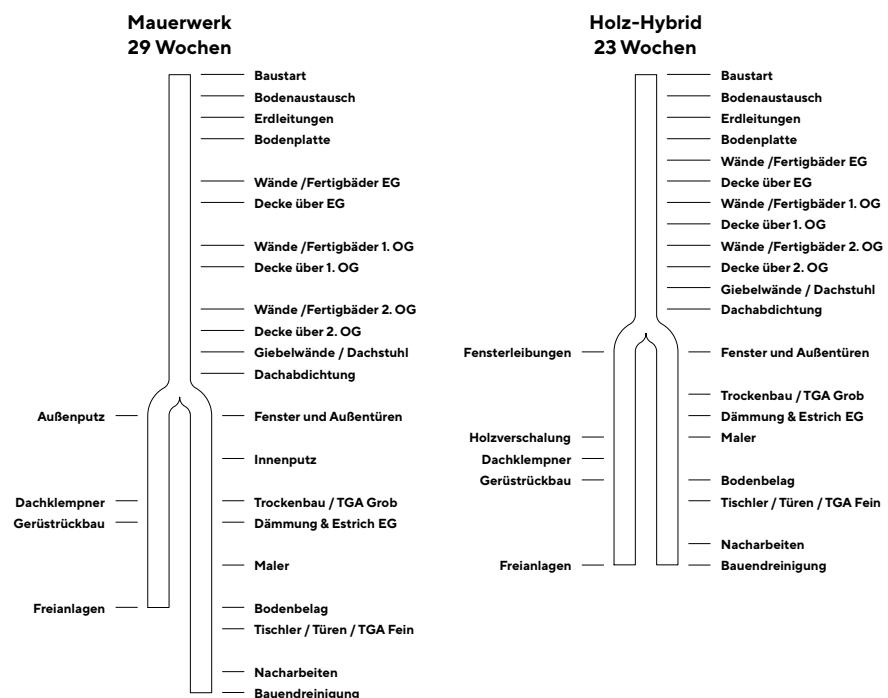


Abbildung 6: Bauzeiten von Haus Mauerwerk und Holz-Hybrid
 Quelle: Florian Nagler Architekten und B&O Gruppe

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 Geschossebenden 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.

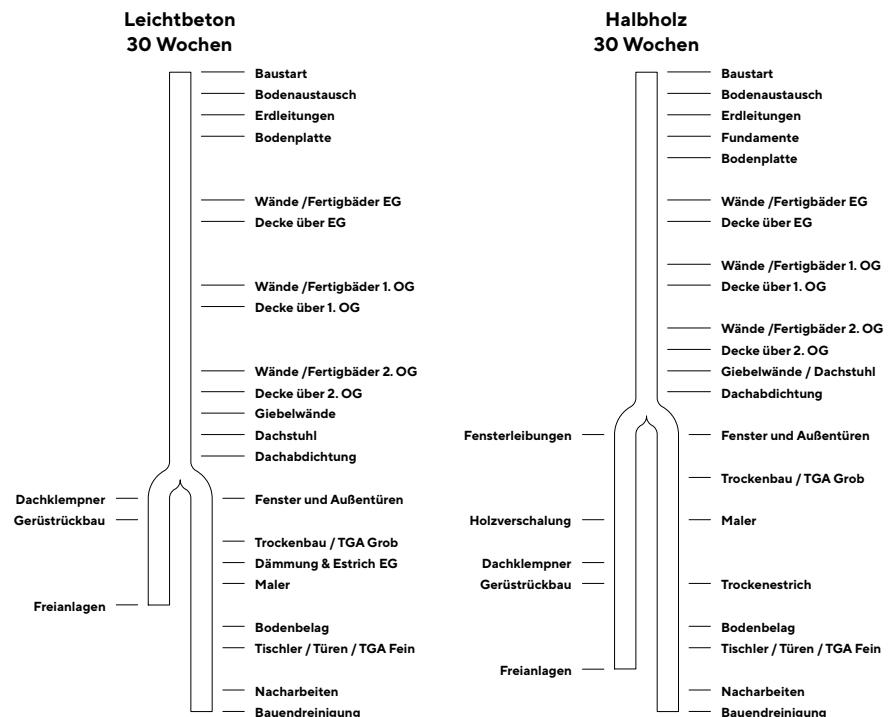


Abbildung 7: Bauzeiten von Haus Leichtbeton und Halbholz
Quelle: Florian Nagler Architekten und B&O Gruppe

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
Vorteile & Belastungen außerhalb der Systemgrenze		Entsorgung	C4	X
		Recyclingpotenzial	D1	
		Effekte exportierter Energie	D2	separat darstellen

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 Gebäude- modell 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 Raumlufttechnische 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 Sanitärobjecte
- KG 420 Rohrleitungen, Verteiler für Raumheizflächen, Raumheizflächen
- KG 430 Rohrleitungen, Verteiler, Anschlussleitungen Lüftung
- KG 440 Niederspannungshauptverteiler, Kabel, Leitungen, Unterverteiler
- KG 450 Leerohre, 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

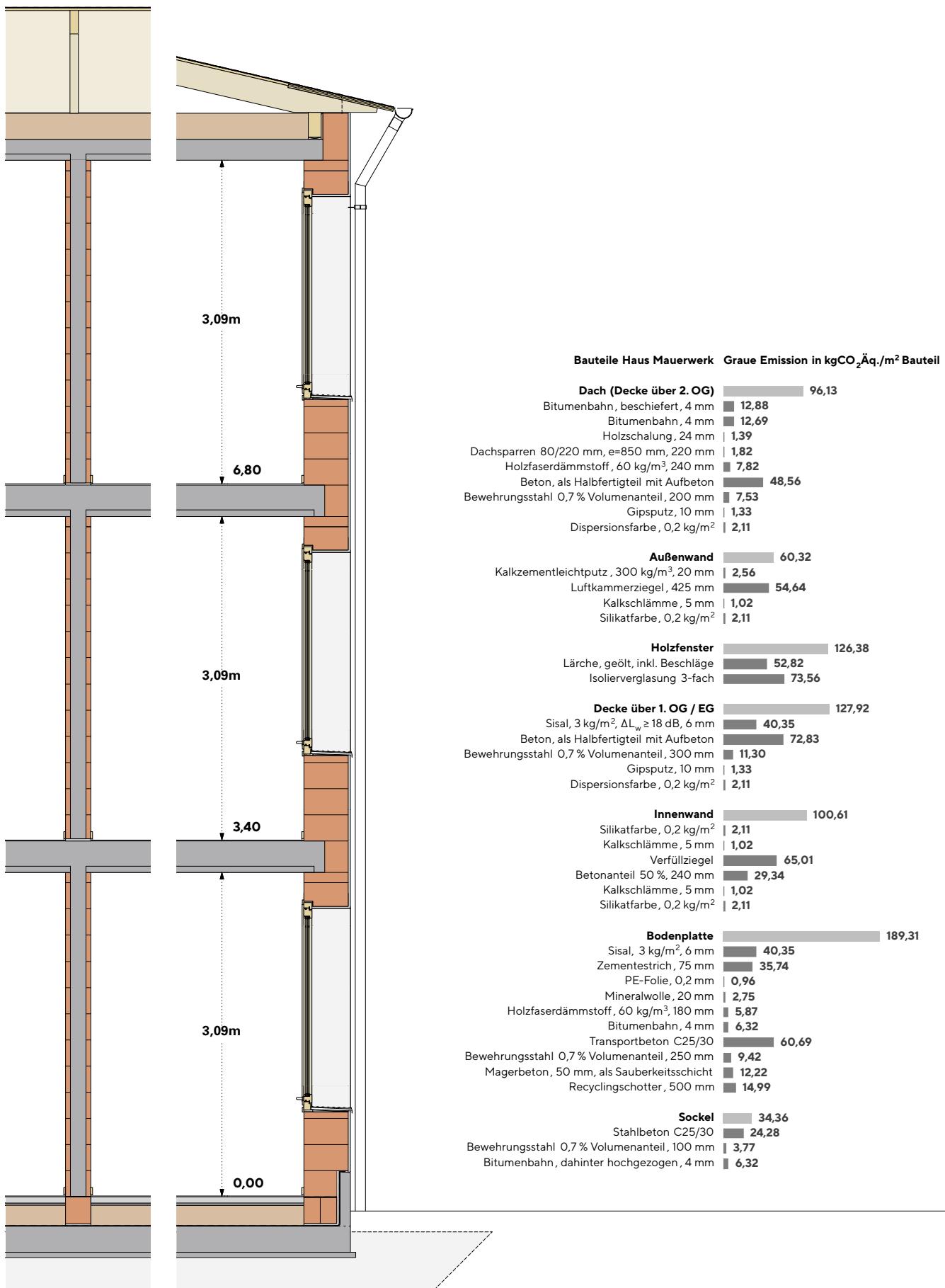


Abbildung 9: Detailschnitt Haus Mauerwerk, Quelle: Florian Nagler Architekten, TU München



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

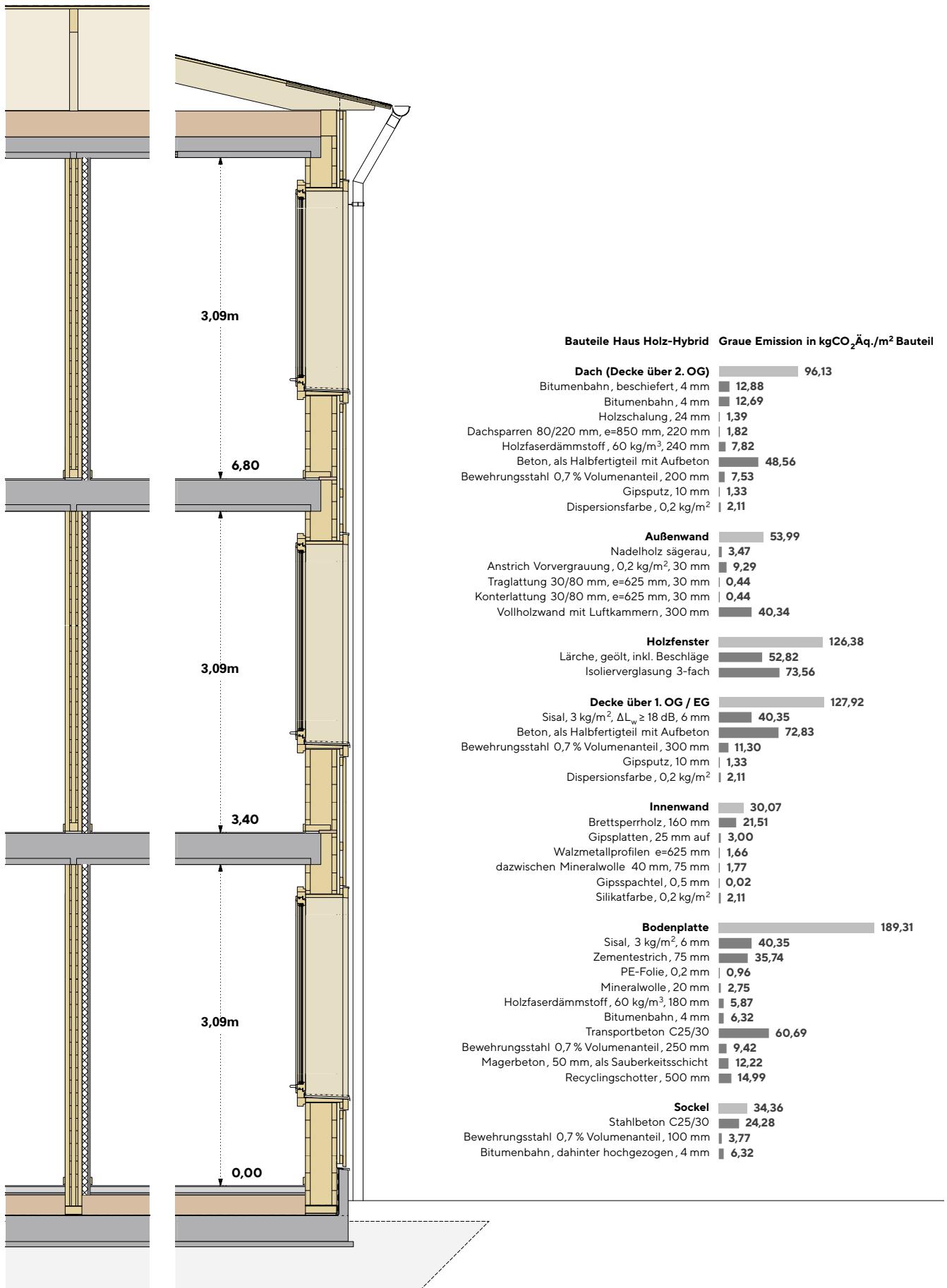


Abbildung 11: Detailschnitt Haus Holz-Hybrid, Quelle: Florian Nagler Architekten, TU München



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

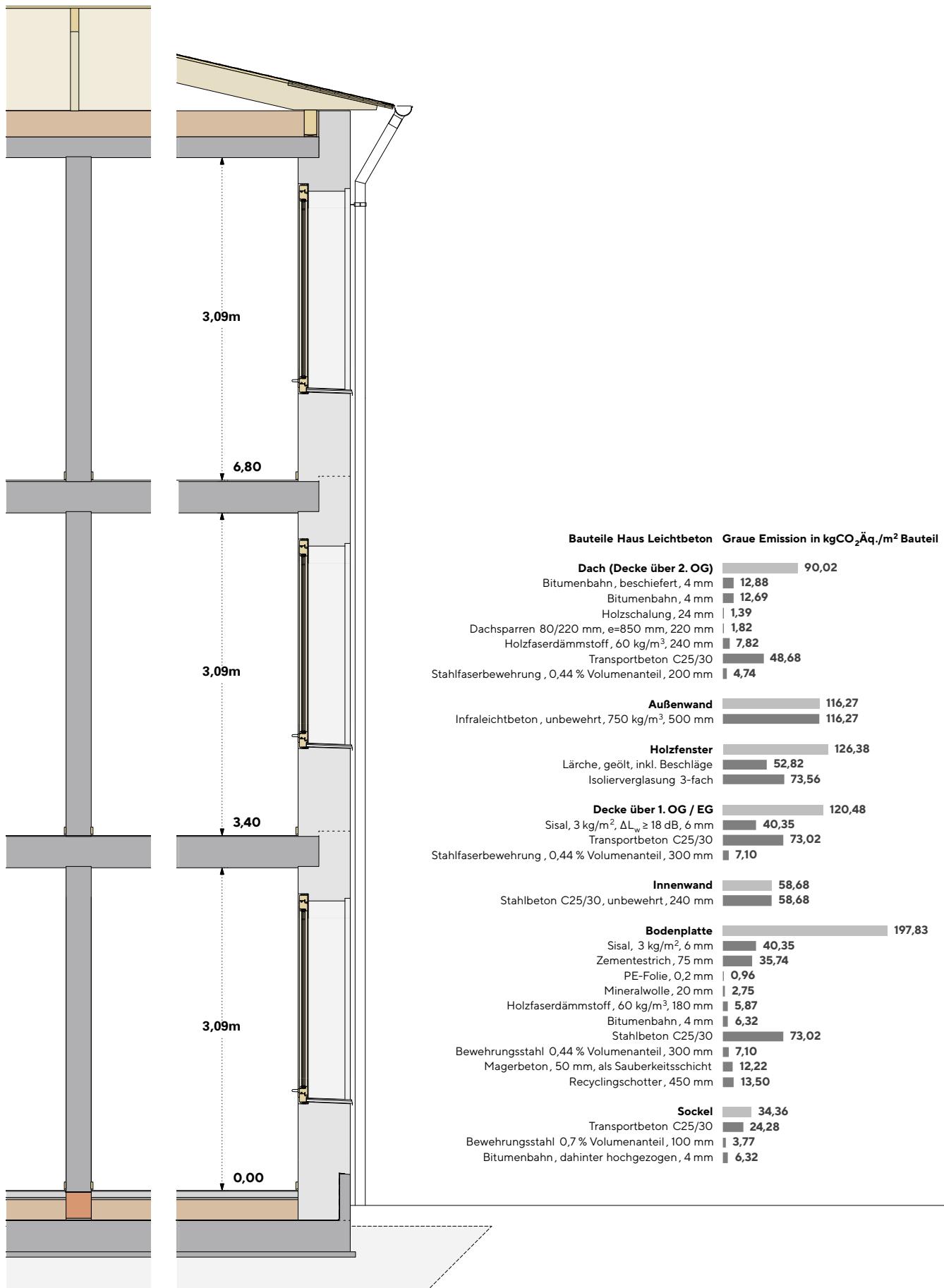


Abbildung 13: Detailschnitt Haus Leichtbeton, Quelle: Florian Nagler Architekten, TU München

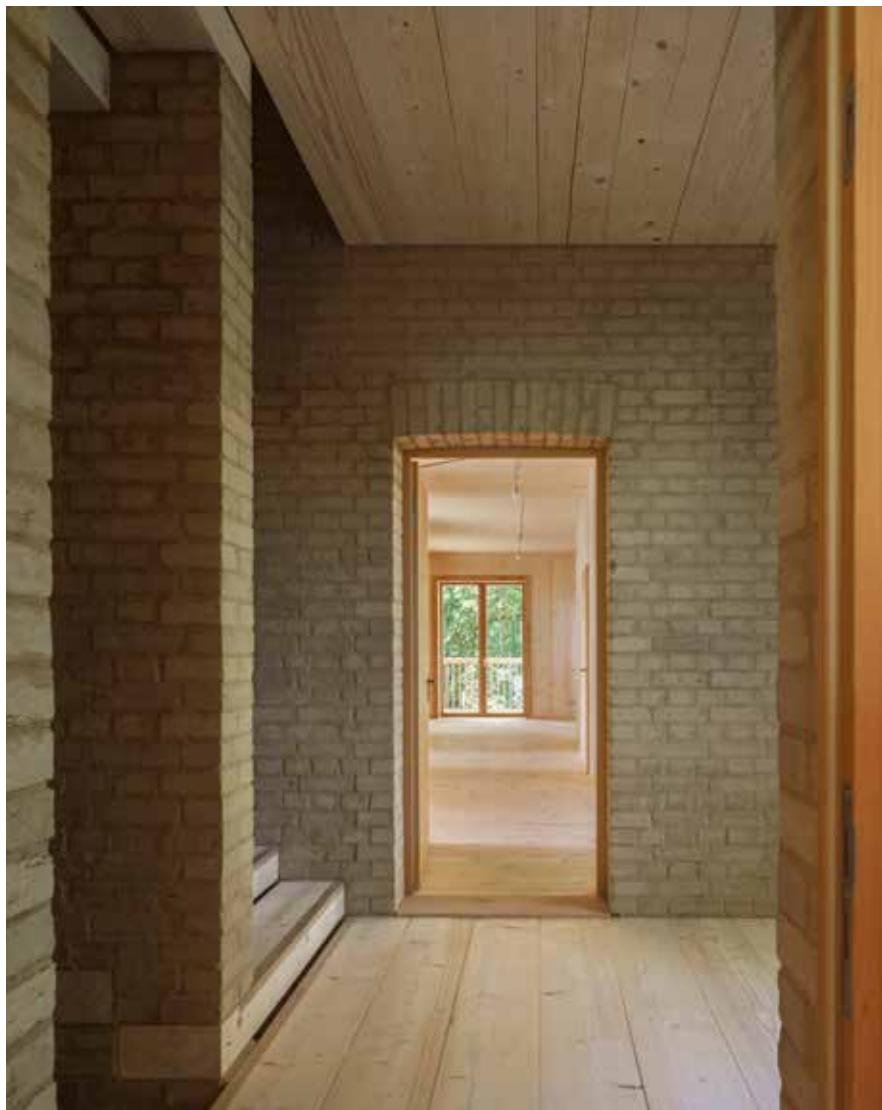


Abbildung 14: Innenansicht Haus Halbholz, Foto: Sebastian Schels, pk Odessa

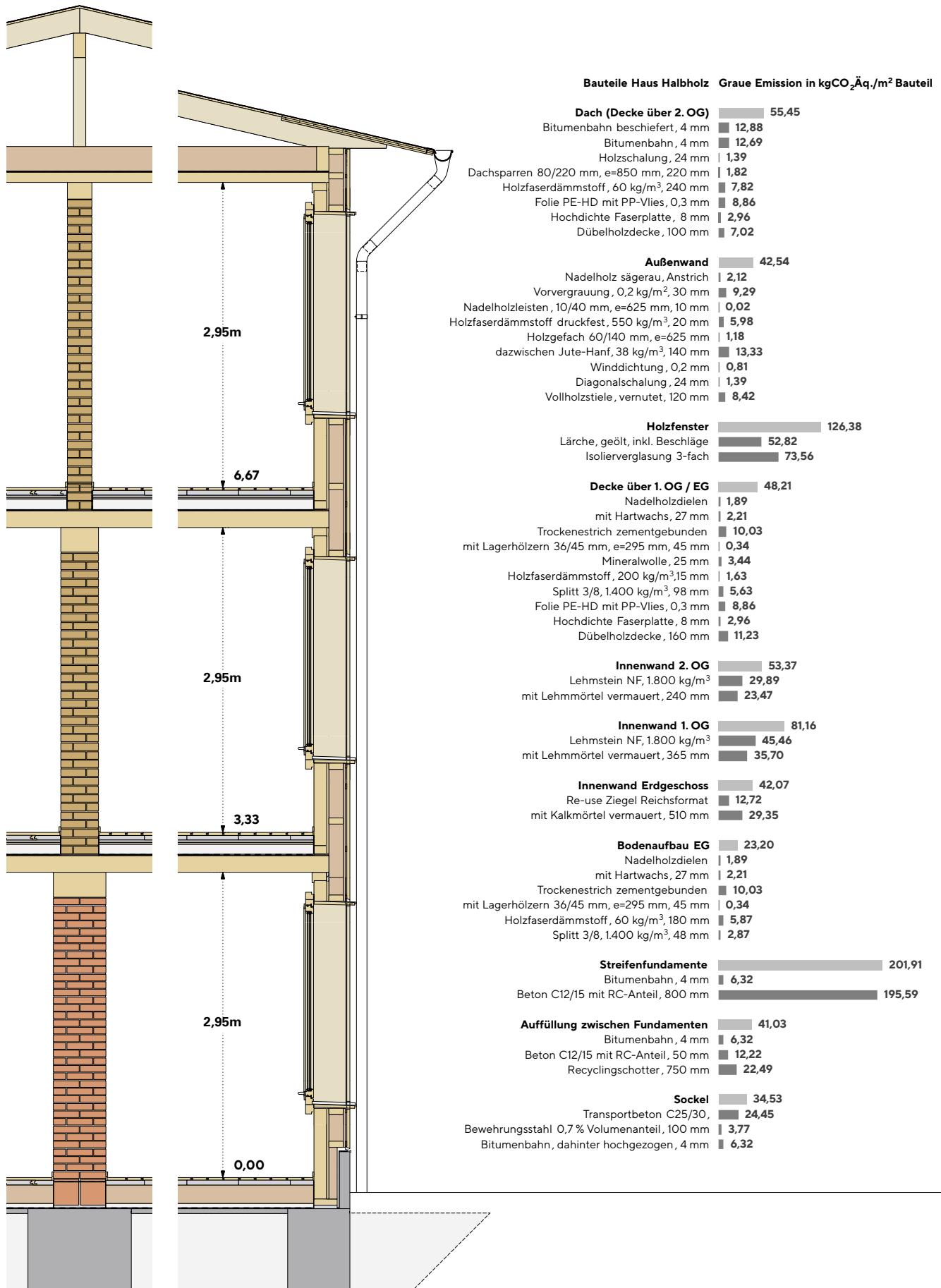


Abbildung 15: Detailschnitt Halbholz, Quelle: Florian Nagler Architekten

Die Abbildungen 9, 11, 13, 15 zeigen die vier Forschungshäuser als Fassaden-
schnitt, daneben sind die Bauteilschichten und jeweils die Grauen Emissio-
nen 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 austieft. 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 Geschossdecken 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/m² 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 Infraleichtbeton 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 gut geschrieben. Das Recyclingpotenzial ist bei Holz-Hybrid und Halbholz deshalb am größten. Beim Haus Halbholz gleicht dieser Wert die Grauen Emissionen sogar nahezu aus.

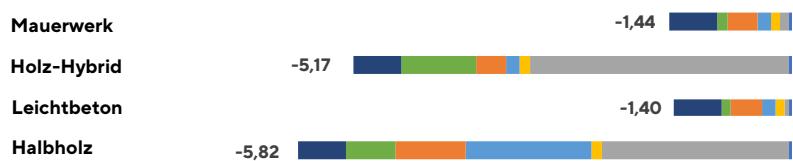
Graue Emissionen für Herstellung, Austausch, Entsorgung (Module A1-3, B4, C3, C4) bezogen auf Treibhauspotenzial (GWP) in kgCO₂Äq./m²NRF*a (Nettoraumfläche & Jahr), Betrachtungszeitraum 50 Jahre



	Halbholz	Leichtbeton	Holz-Hybrid	Mauerwerk
■ Gründung	1,11	1,38	1,07	1,09
■ Außenwände	1,18	3,31	1,57	1,78
■ Fenster & Außentüren	0,54	0,49	0,49	0,49
■ Decken	1,01	2,55	2,32	2,37
■ Dach	0,74	1,01	0,93	0,95
■ Innenwände	0,98	1,30	0,72	1,96
■ Technik	1,31	1,33	1,32	1,33

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 Treibhauspotential (GWP) in kgCO₂Äq./m²NRF*a (Nettoraumfläche & Jahr) nach 50 Jahren



	Halbholz	Leichtbeton	Holz-Hybrid	Mauerwerk
■ Gründung	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04
■ Außenwände	-2,20	-0,05	-3,05	-0,11
■ Fenster & Außentüren	-0,13	-0,10	-0,13	-0,10
■ Decken	-1,49	-0,16	-0,15	-0,16
■ Dach	-0,82	-0,37	-0,36	-0,37
■ Innenwände	-0,59	-0,12	-0,88	-0,11
■ Technik	-0,56	-0,56	-0,56	-0,56

Abbildung 17: Vergleich der vier Forschungshäuser bezüglich Recyclingpotenzial (Modul D) bezogen auf Treibhauspotential (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 CO2Äq.	Recycling-potenzial in kg CO2Äq.	Austauschzyklen
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 Drehkipfenfenster	98	1.464	-950	1,0
Betonfertigteile 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
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	-
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	-
Split 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 Emissionen in kg CO2Äq.	Recycling-potenzial in kg CO2Äq.	Austausch-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 Holzaußentäfelung	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 Drehkipfenfenster	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 m ³ /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 Emissionen in kg CO2Äq.	Recycling-potenzial in kg CO2Äq.	Austausch-
				zyklen
Infraleichtbeton	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 Drehkipfenfenster	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.	Recycling-potenzial 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 Holzaußentände 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 (Dicke1,5 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
Split 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	-
Lehmplatte	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, erzielen 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 Geschosswohnbau 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 kg CO₂Äq./m²NRF*a. Das Ergebnis des Haus Vollholz sogar unter 6 kg CO₂Äq./m²NRF*a. Der Baubeginn der Forschungshäuser Holzrahmen und Vollholz ist für 2024 und 2025 geplant.

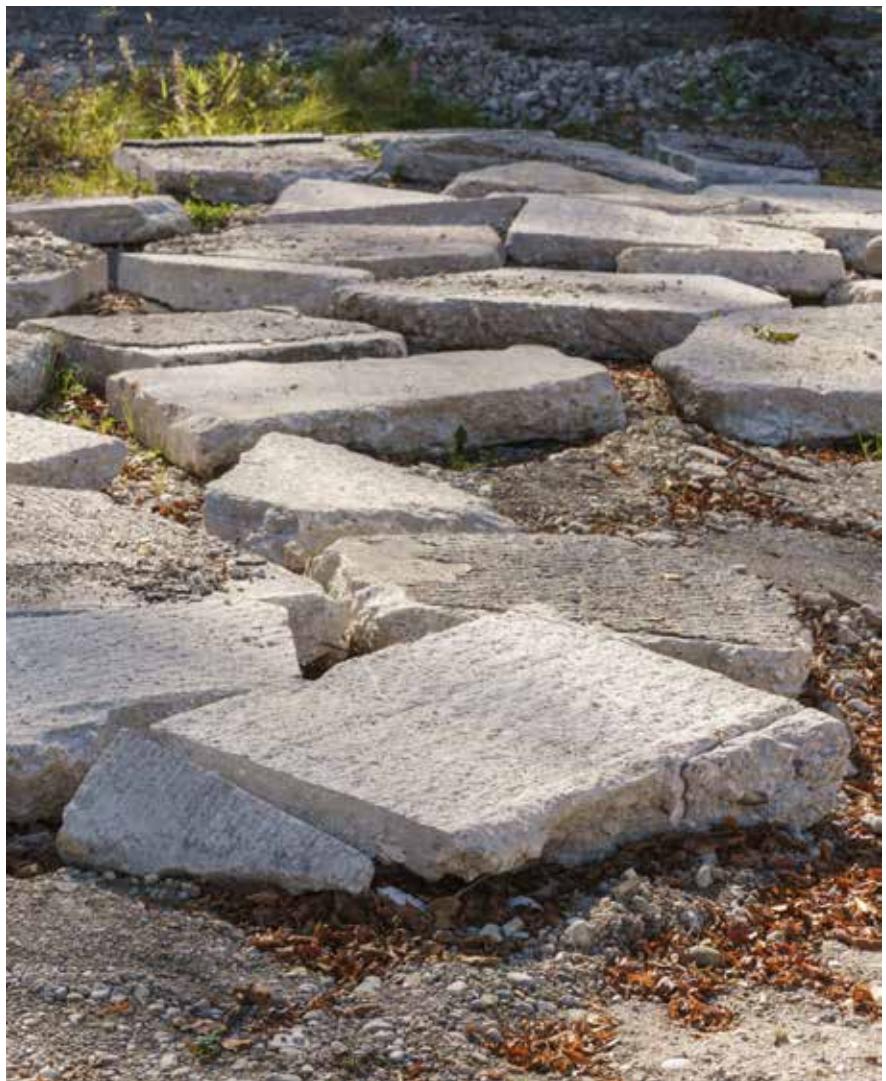


Abbildung 18: Betonplatten, die ehemals einen Werkhallenboden bildeten sollen als Fundamente für die geplanten Forschungshäuser Holzrahmen und Vollholz dienen
Foto: Sebastian Schels, pk Odessa

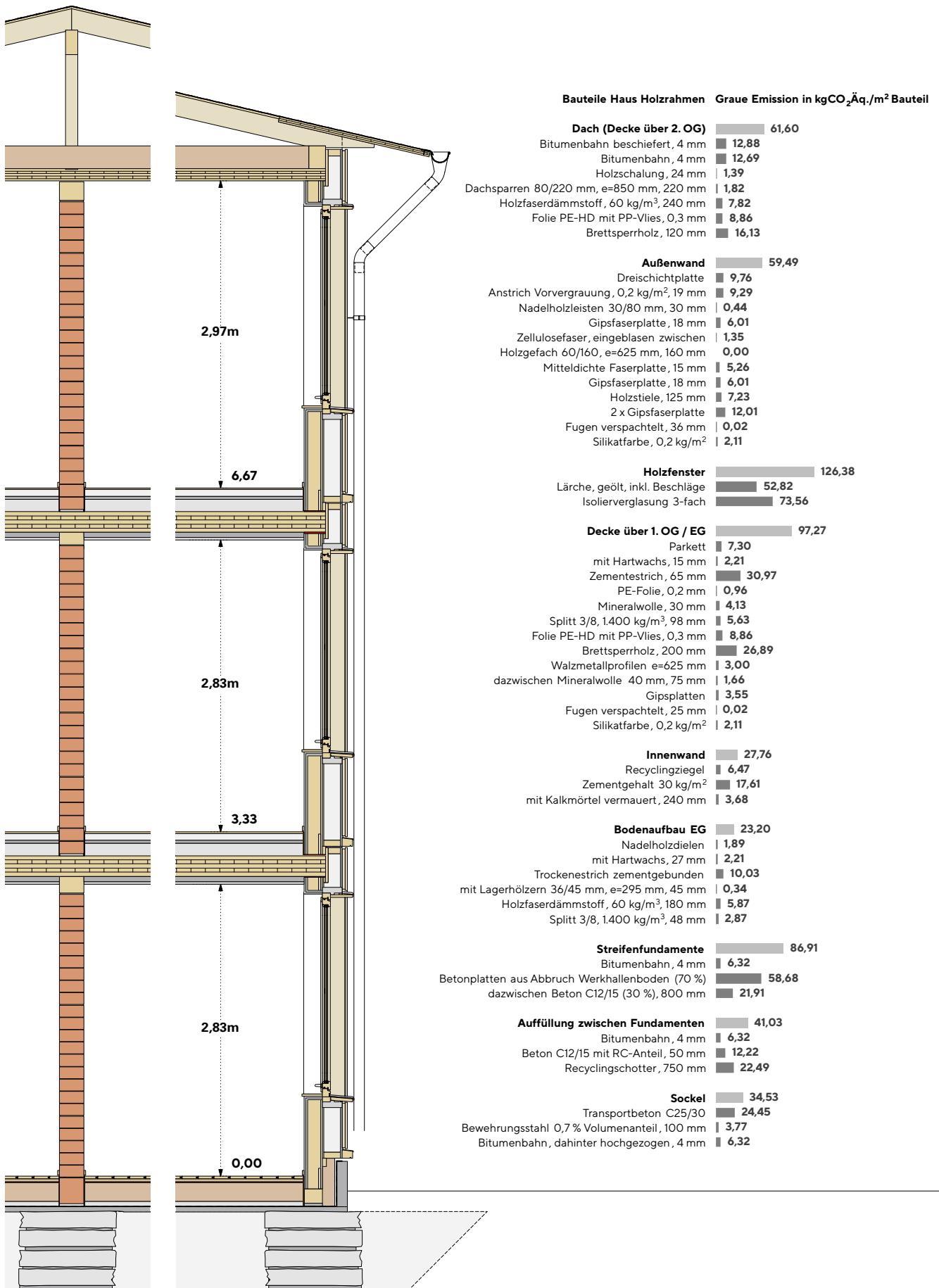


Abbildung 19: Detailschnitt Haus Holzrahmen, Quelle: Florian Nagler Architekten

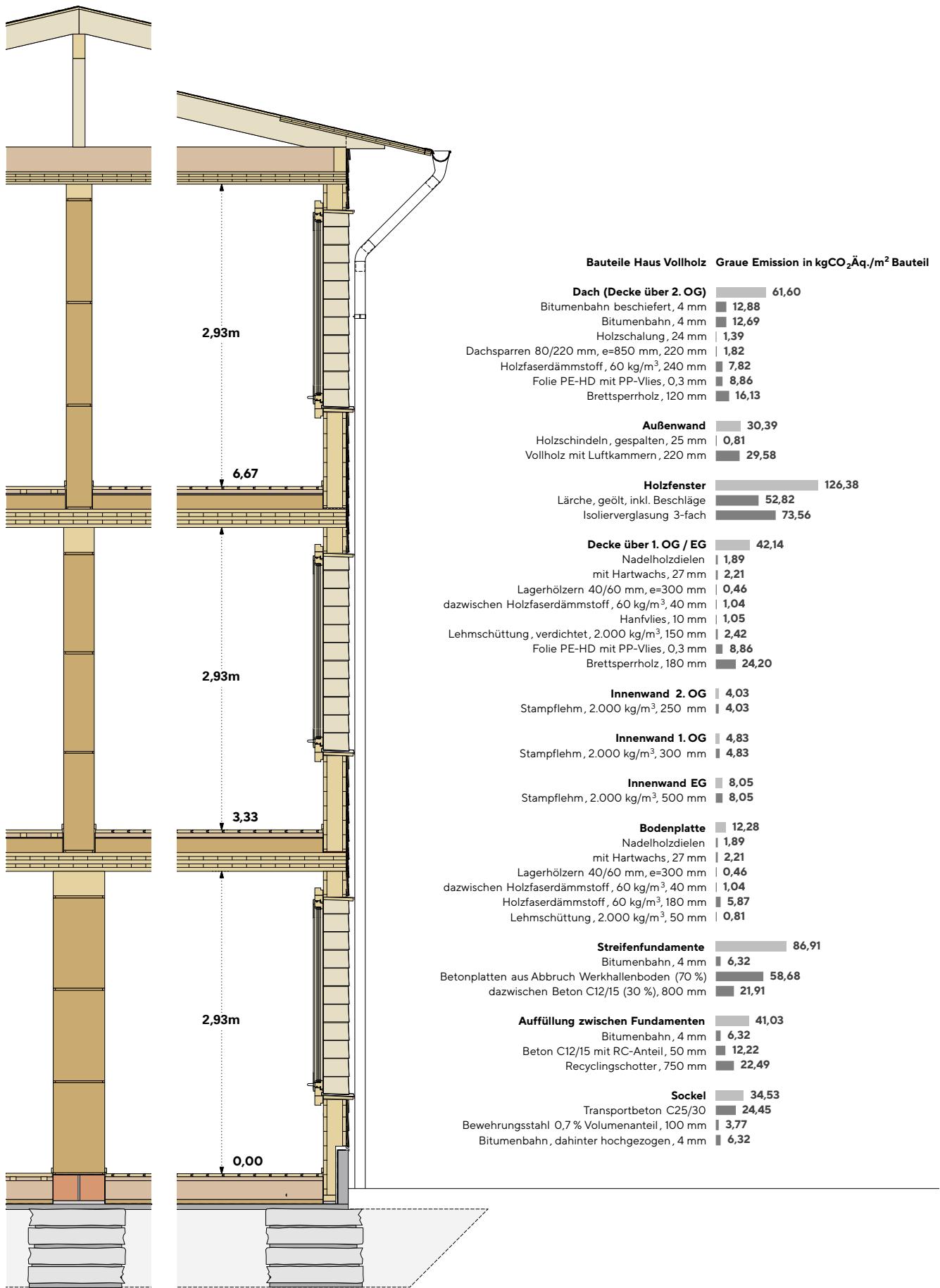


Abbildung 20: Detailschnitt Haus Vollholz, Quelle: Florian Nagler Architekten

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
Brettsperrholz	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 Holzaußentänne	144	6.693	-489	12,0
Schotter 16/32	268.800	5.758	-552	-
Nadelschnitholz - 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 Drehkipfenster	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
Furniersperrholz	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	-
Laubschnitholz - getrocknet	101	16	-74	-
Sand 0/2 getrocknet	297	12	-1	-
Lehmplatte	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
Brettsperrholz	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
Nadelschnitholz - 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
Furniersperrholz	2.162	967	-656	-
Hobelware	5.936	858	-4.349	-
Hanfvlies	303	839	-96	-
Balkenschichtholz	2.366	749	-1.916	0,2
Nadelschnitholz - frisch	10.920	571	-5.773	-
Stahl Feinblech bandverzinkt	188	504	-297	-
Edelstahlblech	137	468	-91	-
Lacksysteme Holzaußentüren halb-pigmentiert	9	437	-32	12,0
Baustroh	4.177	393	-2.631	-
Gipsfaserplatte	960	320	0	-
Betonplaster- 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	-
Fenstergitter	8	152	-14	0,7
XPS-Dämmstoff	20	137	-32	-
Natursteinplatte, hart, Außenbereich	832	29	-2	-
Laubschnitholz - getrocknet	101	16	-74	-
Sand 0/2 getrocknet	297	12	-1	-
Lehmplatte	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 kg CO₂Äq./m²NRF*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 kg CO₂Äq./m²NRF*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 hochwärmédämmendem 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.; Diewald, F.; Nagler, F.; Auer, T. (2021) Einfach Bauen 2: Planen, Bauen, Messen – Anwendung integraler Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen mit Holz, Leichtbeton und hochwärmédämmendem 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

