

Wissenschaftlich-ökologische Bewertung dreier Konstruktionsweisen für Bürobauten anhand Grauer Emissionen am Projektbeispiel

R. Müller, A. Dernbach, D. Jochum, E. Wagner, C. Glock

ZUSAMMENFASSUNG Am Siemens Campus Erlangen wurden Büroneubauten von äquivalenter Architektur, Kubatur und Nutzung aber unterschiedlicher Konstruktionsweisen des Tragwerks errichtet. Diese bieten die einmalige Chance der systematischen vergleichenden ökologischen Bewertung der Konstruktionsweisen hinsichtlich der Grauen Emissionen. Zu diesem Zweck wurde in einem Forschungsprojekt zwischen der Siemens Real Estate (SRE) und der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) jeweils ein realisiertes Referenzgebäude als Stahlbetonskelettbau, als Holz-Beton-Hybridbau und als Stahlbetonsystembau detailliert in einer Ökobilanzierung anhand des Indikators GWP-total analysiert. Der Vergleich der Grauen Emissionen umfasste die Bilanzierungsszenarien Cradle to Site, Cradle to Grave und Cradle to Cradle. Auf Gebäudeebene lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der konstruktiven Durchbildung des Tragwerks sowie der direkt zugehörigen Ausbauelemente. Bemerkenswert ist, dass sich die Grauen Emissionen auf Gebäudeebene im Referenzszenario Cradle to Cradle zwischen den drei unterschiedlichen Konstruktionsweisen um weniger als 10 % unterscheiden. Im Szenario Cradle to Grave werden im Kontrast dazu die Effekte der Wahl der Systemgrenzen bei Ökobilanzierung mit Holzbaustoffen deutlich. Neben den Rohdecken, Wänden, Fundamenten, Fenstern und dem Dachaus- und -aufbau zeigten sich auch die Bodenaufbauten als emissionsintensive Bauteilgruppe. Auf Basis der Auswertungen konnten fundierte und praxisrelevante Ergebnisse und Empfehlungen zur Wahl der Konstruktionsweise, aber auch zu Vergabe- und Dokumentationsanforderungen zum emissionsreduzierten Bauen abgeleitet werden.

Scientific Environmental Assessment of Three Office Building Construction Methods Based on Embodied Emissions: A Project Case Study

ABSTRACT At the Siemens Campus in Erlangen, new office buildings of equivalent architecture, cubature and use but differing structural systems were constructed. This provided a unique opportunity for systematic life cycle assessment (LCA) comparing structural systems with regard to embodied carbon. For this purpose, a research project conducted jointly by Siemens Real Estate (SRE) and the University of Kaiserslautern-Landau (RPTU) carried out a detailed LCA of three realised reference buildings: a reinforced concrete frame, a timber-concrete hybrid and a reinforced concrete system. The assessment was based on the total Global Warming Potential (GWP-total). The comparison of embodied carbon covered the assessment scenarios Cradle to Site, Cradle to Grave and Cradle to Cradle. At building level, the analysis focused on the structural design of the load-bearing system and the directly associated construction elements. Notably, in the Cradle to Cradle reference scenario, the embodied carbon at building level differed by less than 10 % between the three structural systems. In contrast, the Cradle to Grave scenario clearly illustrates the effects of the choice of system boundaries in LCA involving timber building material. In addition to floor slabs, walls, foundations, windows and roof structures, floor build-up was also identified as an emission-intensive component group. Based on the assessment, well-founded and practice-oriented findings and recommendations were derived regarding the selection of structural systems as well as procurement and documentation requirements for low-emission construction.

STICHWÖRTER

Stahlbeton, Treibhausgasemissionen, Graue Emissionen, Lebenszyklusanalyse

1 Einleitung

Das Unternehmen Siemens verfolgt das selbstgesteckte Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2030 und hat daher für die eigenen Gebäude über den Bereich SRE eine Richtlinie bezüglich der Nachhaltigkeit mit verschiedenen Leistungskennzahlen (KPIs) und Zielwerten festgesetzt [1]. Unter dem KPI „Embodied

Carbon“ gibt die SRE für Entwicklungs- und Bauprojekte sowie umfangreichere Sanierungen einen maximalen Ausstoß Grauer Emissionen von 300 kg CO₂-Äq./m²NGF bei Bürogebäuden als Zielwert für das Gesamtgebäude aus. Im Vergleich dazu wird in der DAfStb-Richtlinie „Treibhausreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ [2] als Referenzzustand für Büro- und Nichtwohngebäude 320 kg CO₂-Äq./m²BGF, allerdings be-



Bild 1. „Module“ und untersuchte Gebäude G1 bis G3 am Siemens Campus Erlangen Foto: Siemens Real Estate, bearbeitet
 Fig. 1. „Modules“ and analyzed buildings G1 to G3 at Siemens Campus Erlangen Source: Siemens Real Estate, edited

zogen auf die Bruttogrundfläche (BGF) ausschließlich für die tragende Konstruktion ausgegeben.

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt zwischen SRE und dem Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der RPTU wurden im Zeitraum Januar bis September 2024 drei Büroimmobilien mit dem Schwerpunkt Graue Emissionen vergleichend ökobilanziert und wissenschaftlich ausgewertet. Die untersuchten Gebäude wurden innerhalb der letzten Dekade (2016 bis 2025) am Siemens Campus Erlangen errichtet und weisen eine identische äußere Architektur, Kubatur und Nutzung sowie dieselbe Auftraggeberin auf. Dies bietet die außergewöhnliche Gelegenheit, die Grauen Emissionen verschiedener Konstruktionsweisen des Tragwerks in real umgesetzten Bauvorhaben zu vergleichen, die sämtliche über Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit hinausgehende baulichen Anforderungen sowie nutzungsspezifische Aspekte berücksichtigen. Die sonst übliche variable Architektur und Nutzung, die den Vergleich von Gebäuden und Infrastrukturbauwerken erschwert [3-6], ist aufgrund der besonderen Konstellation eliminiert.

2 Projektvorstellung

2.1 Siemens Campus Erlangen

Mit Beginn der Bauarbeiten im Jahr 2016 legte Siemens den Grundstein zur umfassenden Umgestaltung des Siemens Areals in Erlangen. Bis in die 2030er-Jahre entsteht auf einer Gesamtfläche von über 54 ha mit einem Investitionsvolumen von einer Mrd. Euro ein offener und lebendiger Stadtteil als Siemens Campus Erlangen (SCE) [7]. Die drei untersuchten Gebäude wurden jeweils von verschiedenen Generalunternehmern in unterschiedlichen Bauabschnitten, den sogenannten „Modulen“, umgesetzt. Die Umgestaltung des Campus wird in einem Masterplan in 8 „Module“ untergliedert und unterliegt den in der internen Richtlinie festgelegten Nachhaltigkeitsanforderungen [1]. Über die bloße Wiederverwendung von Materialien hinausgehend, etablieren die neuen Vertragsbestimmungen einen Paradigmenwechsel im Bauwesen: Erstmals werden von Auftraggeberinnenseite Zielwerte definiert

und für „Modul 8“ sogar vertraglich festgelegte CO₂-Emissionsziele hinsichtlich der Grauen Emissionen für die Durchführung des Bauvorhabens vereinbart.

Entsprechend der chronologischen Reihenfolge startete die Firma Max Bögl mit dem „Modul 1“ im Jahr 2016, welches 2020 fertiggestellt wurde. Gleichzeitig begann der Hochbau für „Modul 2“ durch die Firma Zech Bau. Die Fertigstellung erfolgte 2022. „Modul 8“ wurde von 2024 bis Ende 2025 von der Firma Goldbeck errichtet und befand sich somit während der Bilanzierungsstudie noch im Bau. Trotz nahezu identischer architektonischer Rahmenbedingungen unterscheiden sich die untersuchten Gebäude in den drei „Modulen“ grundlegend in ihrer Konstruktionsweise.

2.2 Forschungsprojekt zum ökobilanziellen Vergleich

Die reine Variation der Konstruktionsweise der Gebäude am SCE erlaubt es erstmals, die konstruktiven Unterschiede unabhängig von der Architektur zu bewerten und sichtbar zu machen. Zur Bilanzierung der drei exemplarisch gewählten Gebäude arbeitete die RPTU in enger Abstimmung mit der SRE zusammen. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die wissenschaftliche Bewertung der Konstruktionsweisen mit dem Ziel, emissionsreduzierende Optimierungspotenziale zu identifizieren und Empfehlungen auszusprechen.

Der Untersuchungsrahmen des gemeinsamen Forschungsprojekts sowie die vorliegende Veröffentlichung beschränken sich auf die „Module“ 1, 2 und 8 des SCE, woraus je ein Gebäude bilanziert wurde. Aufgrund der begrifflichen Überschneidung mit dem Modulbegriff der Ökobilanz werden die untersuchten Bauwerke im Folgenden als Gebäude 1, 2 und 3 (G1, G2, G3) bezeichnet. G1 und G2 bezeichnen die Gebäude aus den gleichnamigen „Modulen“, G3 das Gebäude aus „Modul 8“. **Bild 1** zeigt die Lage der „Module“ sowie untersuchten Gebäude G1 bis G3 am Siemens Campus Erlangen.

Um die Methodik der Ökobilanzierung und die daraus resultierenden Ergebnisse angemessen in den Gesamtkontext einordnen zu können, werden in **Tabelle 1** und Abschnitt 2.3 die zentralen Parameter sowie die konstruktiven Unterschiede von G1, G2 und G3 dargestellt. Zur vereinfachten Übersicht werden die Unterschiede in der Konstruktionsweise von G1 bis G3 zusätzlich anhand der schematischen Darstellung der Regelgeschossgrundrisse und Schnitte der Deckensysteme gezeigt (**Bild 2**). Bei mehrgeschossigen Gebäuden verantworten diese mit circa 40 % [8] den Großteil an tragwerksbedingten Emissionen und sind folglich von hoher Relevanz für die Bilanzierung und den gebäudeübergreifenden Vergleich [9-11].

2.3 Konstruktionsweisen

2.3.1 G1: Stahlbetonskelettbau

Bei G1 wurde das Tragwerk in Stahlbeton-Skelettbauweise ausgeführt. Charakteristisch für das von Max Bögl errichtete Gebäude sind Stahlbeton-Flachdecken in Ort betonbauweise. Diese wurden schlaff bewehrt und mit einer Betondruckfestigkeitsklasse C30/37 sowie einer Dicke von 24 cm ausgeführt. Dabei wurden alleine bei der Ausführung der Stahlbeton-Flachdecke bereits 3 100 m³ Beton verbaut.

Tabelle 1. Konstruktionsweise und Materialeinsatz bei G1 bis G3
Table 1. Design and material used in G1 to G3

	Stahlbetonskelettbau (G1)	Holz-Beton-Hybridbau (G2)	Stahlbetonsystembau (G3)
Rohdecken	Stahlbetonflachdecke h=24 cm. Deckenquerschnitt im Gebäude einheitlich. ca. 7500 t Beton (C30/37), 430 t Bewehrung.	Cree-Deckenelemente (HBV) $h_{ges}=40$ cm, $h_c=13$ cm, $h_t=30$ cm, Deckenquerschnitt variiert im Gebäude, ca. 5200 t Beton (C40/50), 290 t Holz (GL28c) und 360 t Bewehrung.	Flach – und Rippendecken, $h_{Rippe}=25$ bzw. 32,5 cm, $h_{Platte}=10$ cm. Teilweise vorgespannt. Deckenauflagerung auf Stahlprofil-Unterzügen. Ca. 4800 t Beton (C40/50), 280 t Bewehrung und 250 t Stahlunterzüge
Bodenaufbau	ca.10500 m ² Hohlböden; ca. 430 m ³ Zement- und CAF-Estrich; Oberbeläge Teppich, Linoleum und Fliesen.	ca. 10900 m ² Hohlböden; ca. 358 m ³ Zement- und CAF-Estrich; Oberbeläge Teppich, Linoleum und Fliesen.	ca. 12930 m ² Hohlböden; ca. 1900 m ³ Zement- und CAF-Estrich; Oberbeläge Teppich, Linoleum und Fliesen, bituminöse Abdichtung
Stützen	273 Stahlbetonstützen (C20/25 – C40/50); Abnahme der Festigkeit mit zunehmender Geschosshöhe. Ca. 250 t Beton.	172 Stahlbetonstützen (C35/45 oder C50/60) sowie 94 Holzstützen (GL25h).	103 Stahlbetonstützen (C50/60), 480 Stahlstützen im Innenbereich und 337 Stahlstützen zum Anschluss der Außenwand. Ca. 100 t Beton und 200 t Stahlprofile. Für die Stahlstützen ist eine Brandschutzverkleidung berücksichtigt.
Wände	FT-Außen- und Innenwände, ergänzt durch vereinzelte Ortbetonwände. Attika als Halbfertigteil (Doppelwand). vereinzelt Kalksandstein-Mauerwerkswände im Keller. Festigkeitsklassen C35/45 und C40/50. ca. 3600 t Beton.	ca. 501 t Cree-Holzwannelemente (zementgebundene Spanplatten, KVH, BSH, OSB3) sowie ca. 2400 t Stahlbetonwände in den aussteifenden Bereichen der Treppenhäuser mit den Festigkeitsklassen C30/37 und C50/60.	Wände überwiegend in Systembauweise errichtet. Bei den Außenwänden sind die Fertigteile mit Stahlstützen ergänzt. Insgesamt ca. 2760 t Beton (C30/37 und C35/45) sowie 230 t KS-Mauerwerk.
Wanddämmung	Reine Außendämmung auf Massivwänden als Teil der Alcobond Fassade (Außenansicht) & des WDVS (Fassade Innenhof). Mineralfaserdämmung 16-18 cm.	Cree-Wannelemente (Ständerbauweise) mit Dämmmaterial gefüllt, zusätzliche Dämmschicht auf Wandinnenseite. WDVS auf Außenseite (Bereich Innenhof).	18 cm Mineralwolldämmung der Kassetten der Außenfassade. Zum Innenhof hin ebenfalls Kassettdämmung (kein WDVS).
Gründung	Block- & Balkenfundamente, Bodentrasse & Bodenplatten. Fundamente unter EG C30/37 und unter KG C35/45. Ca. 3000 t Beton. Gegen Erdreich Perimeterdämmung aus XPS.	Überwiegend Streifenfundamente der Festigkeitsklassen C30/37, C35/45 und C40/50. Ca. 4000 t Beton. Gegen Erdreich Perimeterdämmung aus XPS.	Einzel- und Streifenfundamente aus Beton der Festigkeitsklasse C25/30. Ca. 2000 t Beton. Gegen Erdreich Perimeterdämmung aus XPS.
Treppen	ca. 145 t Beton C40/50.	ca. 145 t Beton C30/37.	ca. 225 t Beton C35/45.
Fenster	ca. 2500 m ² Fensterfläche.	ca. 1935 m ² Fensterflächen.	ca. 2220 m ² Fensterfläche.
Fassadenoberfläche	ca. 3100 m ² Aluminiumverbundbleche & ca. 1300 m ² WDVS-Oberfläche (abzgl. Wandaußendämmung).	ca. 3200 m ² Aluminiumverbundbleche und ca. 1300 m ² WDVS-Oberfläche.	ca. 5350 m ² Aluminiumverbundbleche (einheitliche Fassade, kein WDVS).
Abhangdecken	Deckenkoffer, bereichsweise abgehängte Decken und Deckensegel mit Akustik- und Kühlfunktion.	Deckenkoffer, bereichsweise abgehängte Decken und Deckensegel, Bandrasterdecken, Mineralfaserplatten, GK-Platten und Feuchtraumplatten.	Mineralfaser-Deckenplatten, Gipskarton-Platten oder gelochte Gipskarton-Platten. Im EG zusätzlich gelochte Metallrasterdecken.
Dachausbau	Gründach (Mineralwolle, Dicht- & Schweißbahnen, Filterflies, Rundkies 16/32, Einschichtsubstrat, Foamglas, PVC-Folie, Drainagematten), Dachaufbauten zur Einhausung TGA aus Stahlprofilen.	Gründach (analog G1), Dachaufbauten zur Einhausung TGA aus Stahlprofilen.	Gründachaufbau (analog zu G1), Dachaufbauten für TGA aus Stahlprofilen und Trapezblech.

2.3.2 G2: Holz-Beton-Hybridbau

Das von der Firma Zech Bau errichtete G2 ist durch ein hybrides Holz-Beton-Verbund-Rippendeckensystem und Holztafelwände charakterisiert. Die Betondruckfestigkeitsklassen variieren zwischen C30/37, C40/50 und C50/60. Im Cree-Deckensystem (HBV) sind 13 cm dicke Stahlbetonplatten mit Brettschichtholzträgern der Güte GL 28c verbunden. Die Stützen sind einreihig

ausgeführt. Insgesamt wurden bei G2 etwa 2170 m³ Beton im Deckensystem eingebaut.

2.3.3 G3: Stahlbetonsystembau

Charakteristisch für G3 ist die von der Firma Goldbeck angewandte Systembauweise mit teilweise vorgespannten Stahlbeton-Flach- und -Rippendecken und integrierten Stahlunterzügen so-

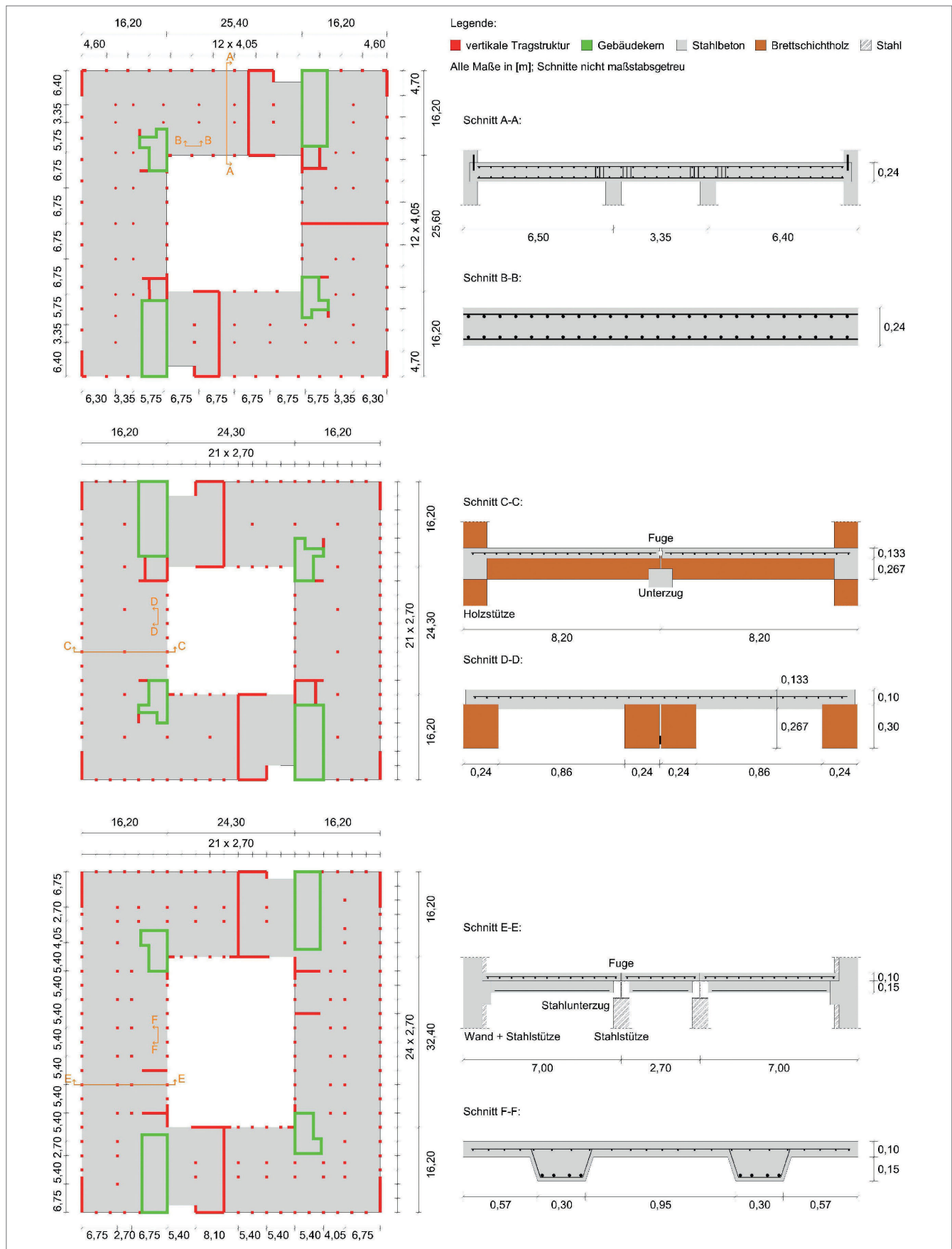


Bild 2. Grundrisse und Schnitte der Gebäude G1 (oben), G2 (Mitte) und G3 (unten) schematisch Grafik: RPTU
 Fig. 2. Schematic floor plans and sections of buildings G1 (top), G2 (middle) and G3 (bottom) Source: RPTU

wie Stahlstützen. Die Betondruckfestigkeitsklassen variieren zwischen C35/45, C40/50 und C50/60. Insgesamt kamen etwa 2 000 m³ Beton im Deckensystem zum Einsatz.

3 Ökobilanzierung der Grauen Emissionen

3.1 Definition des Untersuchungsziels

Die Ökobilanzierung der drei Gebäude wurde in Anlehnung an die Grundsätze und Anforderungen nach DIN EN ISO 14040 [12] und DIN EN ISO 14044 [13] durchgeführt. Als Ziel der Bilanzstudie wurden als signifikanteste Größe im Zusammenhang der Klimaverträglichkeit [14] die Grauen Emissionen betrachtet. Letztere werden im Rahmen der Studie in Anlehnung an [8] definiert als diejenigen Treibhausgasemissionen, welche durch die Herstellung, Errichtung und Entsorgung der Gebäude, nicht aber deren Betrieb, anfallen und in CO₂-Äquivalenten angegeben. Somit war eine Bewertung der Gebäude G1 bis G3 in Bezug auf den KPI „Embodied Carbon“ der SRE möglich [1]. Die Bilanzierung der Grauen Emissionen erfolgte anhand des Indikators Global Warming Potential (GWP-total) als Summe der Anteile aus fossilem und biogenen GWP sowie des GWP aus Landnutzung und Landnutzungsänderung (engl. „land use and land use change“, GWP-luluc). Die Auswertung der Ökobilanz zielte auf die Identifikation der relevantesten GWP-Treiber unter den Bauteilgruppen sowie zwischen den Gebäuden verschiedener Konstruktionsweisen ab. Hierdurch werden sowohl konstruktions- als auch materialspezifische Handlungsempfehlungen für die SRE als Bauherrin abgeleitet, um die Grauen Emissionen ihrer Büroimmobilien weiter senken zu können als auch die Effektivität ihrer diesbezüglichen KPIs zu reflektieren.

3.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

3.2.1 Bilanzierte Bauteile

Der Untersuchungsrahmen umfasste initial die möglichst vollständige Bilanzierung sämtlicher Bauteile in jedem der drei Gebäude, wobei sich entsprechend der verfügbaren qualifizierten Datengrundlage Einschränkungen ergaben. Im Sinne valider Ergebnisse sowie einer Sicherstellung der objektiven Vergleichbarkeit der bilanzierten Gebäude wurde der Betrachtungsfokus auf den Rohbau gelegt und nur ausgewählte und direkt mit dem Rohbau im Zusammenhang stehende Positionen des Ausbaus in die Berechnung einbezogen. Auf die Bilanzierung der TGA wurde verzichtet, da diese bei den Beispielprojekten nicht in direktem Zusammenhang mit den baukonstruktiven Unterschieden der verglichenen Gebäude steht. Zudem galt es zu vermeiden, dass der Gesamtvergleich durch im TGA-Bereich teilweise nur bedingt vergleichbare Gebäudedokumentation verfälscht würde.

Auf Bauteilebene wurden innerhalb aller Gebäude einheitlich folgende elf Bauteilgruppen bilanziert: Rohdecken, Bodenaufbauten, Stützen, Wände und Wanddämmung, Gründung, Treppen, Fassadenoberfläche, Fenster, Abhangdecken, Dachausbau. Die Rohdecken umfassten dabei sämtliche tragenden Deckenplatten mit zugehörigen Unterzügen beziehungsweise Rippenquerschnitten sowie die tragende Platte als oberen Gebäudeabschluss im Flachdach. Folglich enthielt die Kategorie Dachausbau noch die Abdichtung, Dämmung und Schüttungen auf dieser obersten

Platte sowie die im Stahlbau ausgeführte Einhausung auf dem Dach befindlicher TGA. Unter der Kategorie Gründung wurden sowohl Einzel- und Streifenfundamente als auch Bodenplatten zuzüglich der Dämmung gegen das Erdreich erfasst. Die Wanddämmung umfasste sämtliche vertikal angeordnete Dämmung an oder in Wandquerschnitten, auch die Dämmung im WDVS, dessen übrige Bestandteile zusammen mit den Aluminiumpaneelen in der Fassadenoberfläche subsummiert wurden. Da in G2 Holzständerwände ausgeführt sind, deren Dämmung teilweise innerhalb des Wandquerschnitts liegt, zeigt sich die direkte Zuordnung der übrigen Wandaußendämmung zur Fassade im Sinne der Vergleichbarkeit der Konstruktionsweisen als nicht zweckmäßig. Die Kategorie Bodenaufbauten enthielt alle Estriche und Beläge oberhalb der Rohdecken oder Bodenplatten.

3.2.2 Angesetzte Lebensdauer der Bauteile und Lebenszyklusphasen

Die Komplexität in der Bilanzierung mehrschichtiger Bauteile trug dazu bei, dass auf den materialspezifischen Ansatz von Austauschhäufigkeiten während des Gebäudelebenszyklus bewusst verzichtet wurde. Entsprechend des Untersuchungsziels sollte der Betrachtungsfokus auf die Konstruktionsweisen der Neubauten und die damit verbundenen Grauen Emissionen gelegt werden. Es ist anzumerken, dass sich das Gesamtergebnis der Ökobilanzierung bei Berücksichtigungen von Bauteilaustauschen verändert.

Alle ökobilanziellen Berechnungen mit Blick auf das GWP-total wurden jeweils vollständig für die Bilanzierungsszenarien Cradle to Site (Lebenszyklusphasen A), Cradle to Grave (Lebenszyklusphasen A-C) und Cradle to Cradle (Lebenszyklusphasen A-D) nach [15] für eine Lebensdauer von 50 Jahren durchgeführt.

3.2.3 Verwendete Datensätze

Insbesondere für die Bilanzierung der Materialien der Tragstruktur – Beton, Betonstahl, verschiedene Holzwerkstoffe und Baustahl – wurden generische Datensätze aus der Ökobaudat, Version 2023, zum Ansatz gebracht [16]. Die generischen Datensätze, die einer theoretischen Modellierung entstammen und nicht auf Industriedaten basieren, enthalten aufgrund der Modellierungsunsicherheit je nach Vollständigkeit Sicherheitszuschläge zwischen 10 % und 30 % auf die GWP-Anteile GWP-fossil und GWP-luluc [17]. Auf durchschnittliche und repräsentative Datensätze wurde lediglich mangels Alternativen vereinzelt zurückgegriffen. Nur bei den Materialien des Ausbaus und konkreten Bauprodukten, die aufgrund ihrer speziellen Funktionen verbaut wurden, wie beispielsweise Akustik-Deckensegel mit Kühlfunktion, wurden in Teilen auch spezifische Datensätze der jeweiligen Hersteller verwendet. Für den Vergleich der Konstruktionsweisen zwischen den drei bilanzierten Gebäuden ist der Ansatz von Datensätzen, die in gleichem Maße für ein vielfach verwendetes Material repräsentativ sind, essentiell. Andernfalls droht die Vergleichsrechnung und deren wissenschaftliche Auswertbarkeit durch spezifische Datensätze verschiedener Hersteller verzerrt zu werden. Die Bilanzierung der Fenster erfolgte vereinfacht durch Umlegung eines herstellereigenen Datensatzes der primär in

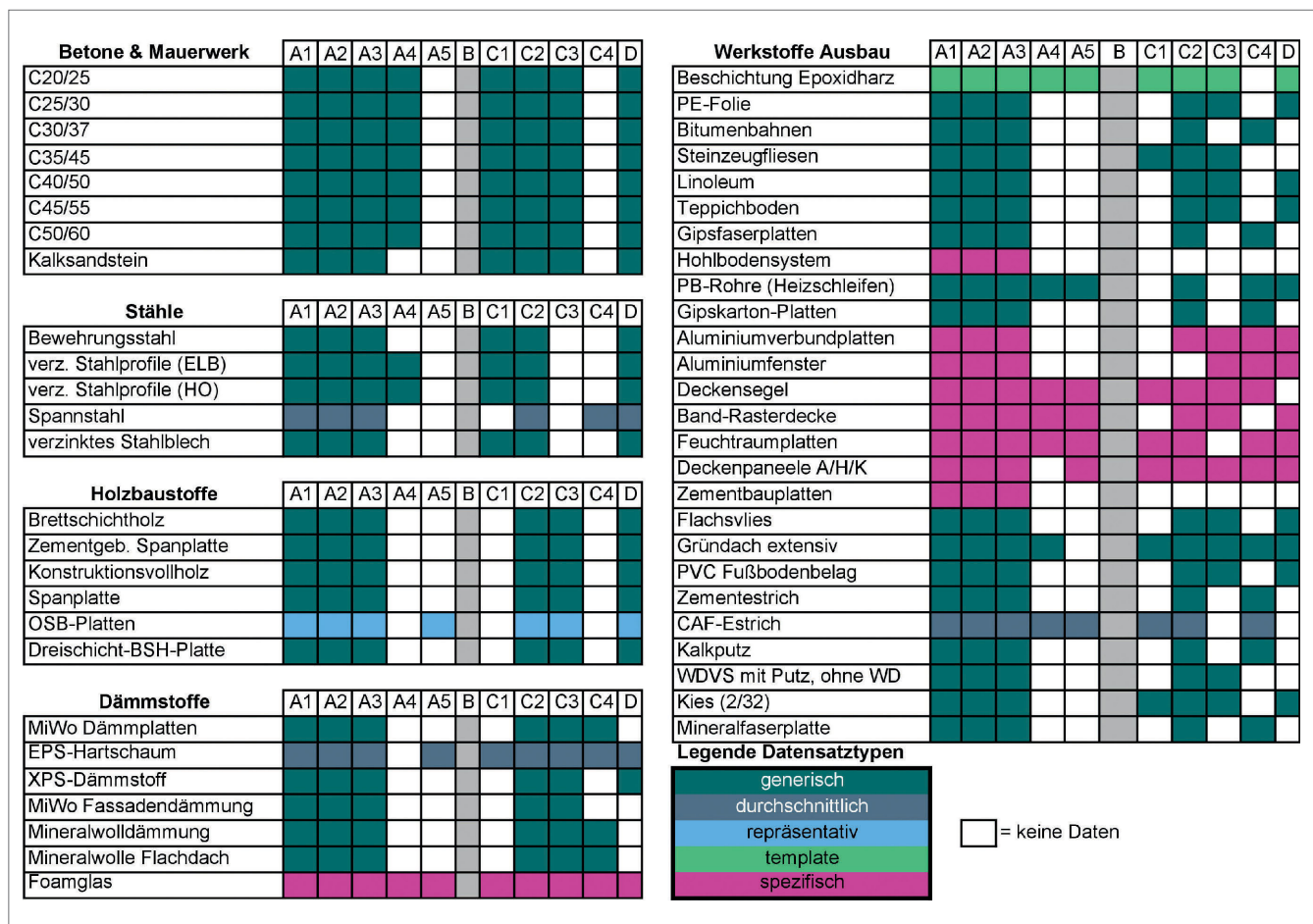


Bild 3. Qualitative Übersicht der Typen verwendeter Datensätze und enthaltener Lebenszyklusdaten Grafik: RPTU
 Fig. 3. Qualitative overview of the types of data sets used and the life cycle data contained Source: RPTU

G1 verbauten Fenster auf die Fensterfläche der anderen Gebäude, da für die übrigen Gebäude kein entsprechender Datensatz verfügbar war. Anhand der Relevanz des Baustoffs Beton für das Bilanzierungsergebnis ist zu erwähnen, dass die ermittelten Betonvolumina im Rahmen der Untersuchungen ausschließlich in Abhängigkeit der angegebenen Betondruckfestigkeitsklasse differenziert wurden. Weiterführende Informationen zu den Betonrezepturen, insbesondere zu den verwendeten Zementen oder zum Einsatz von RC-Beton, lagen nicht vor. Die Datensätze für die Betondruckfestigkeitsklassen C35/45, C40/50 und C45/55 wurden mangels Verfügbarkeit in der Ökobaudat durch Interpolation zwischen den Datensätzen der übrigen Druckfestigkeitsklassen abgeleitet. Dies trägt dem Zusammenhang Rechnung, dass Zementgehalt und Betondruckfestigkeit positiv korrelieren.

Da die generischen Datensätze für die Ökobaudat als Gesamtheit vom BBSR beauftragt und vom selben Lieferanten bereitgestellt werden [18], kann von einer kontrollierten und einheitlichen Qualität der Datensätze als Vergleichsgrundlage ausgegangen werden. Zudem sind die generischen Datensätze hinsichtlich enthaltener Bilanzmodule einheitlich ausgelegt. Dennoch ist anzumerken, dass die Gesamtheit der verwendeten Datensätze in Bezug auf die ausgewiesenen Module lückenhaft ist, lediglich die Module der Herstellung A1-A3 sind in jedem Fall enthalten. Diesen Umstand sowie die Verteilung der Datensatztypen zeigt Bild 3 auf. Hierdurch verfügt das Bilanzszenario A gegenüber A-C und A-D über eine erhöhte Aussagekraft.

3.3 Durchführung der Sachbilanz

Im Sinne größtmöglicher Transparenz wurden sowohl Sachbilanz als auch Wirkungsabschätzung aufwändig händisch in MS Excel durchgeführt, spezielle Software zur Ökobilanzierung wurde bewusst nicht verwendet. Hierdurch sollte die vollständige Nachvollziehbarkeit aller Rechenschritte und Ergebnisse gewährleistet werden. Zudem unterschieden sich die vorliegenden BIM-Modelle der drei bilanzierten Gebäude signifikant im Grad sowie der Vollständigkeit der Attribuierung und Detaillierung, sodass die Bilanzierung händisch unter ständigem Abgleich der Bilanzgrenze erfolgen musste. Primäre Grundlage der Massenermittlung waren die Planunterlagen. Sofern BIM-Modelle mit hinreichender Eignung vorlagen, konnten diese durch Export von Bauteillisten und Anwendung von Filtern für schwer überschaubare Positionen, wie zum Beispiel die Gründung, ergänzt werden. Die ermittelten Massen wurden fortlaufend anhand der Nutzfläche der Gebäude, im Vergleich zwischen den Gebäuden oder im Austausch mit Vertreter:innen der SRE plausibilisiert. Vereinzelt mussten fundierte Annahmen zu Materialgütern, insbesondere Betonfestigkeitsklassen, oder Ausführungsvarianten beziehungsweise Planungsständen getroffen werden. In der Betrachtung von Massen beziehungsweise Volumina muss bei G3 die um 14 % größere Nutzfläche beachtet werden, da G3 eine geringfügig abweichende Grundfläche aufweist. In weiterführenden Vergleichen auf Ebene des GWP pro m² korrigiert sich diese Differenz im Vergleich zu G1 und G2.

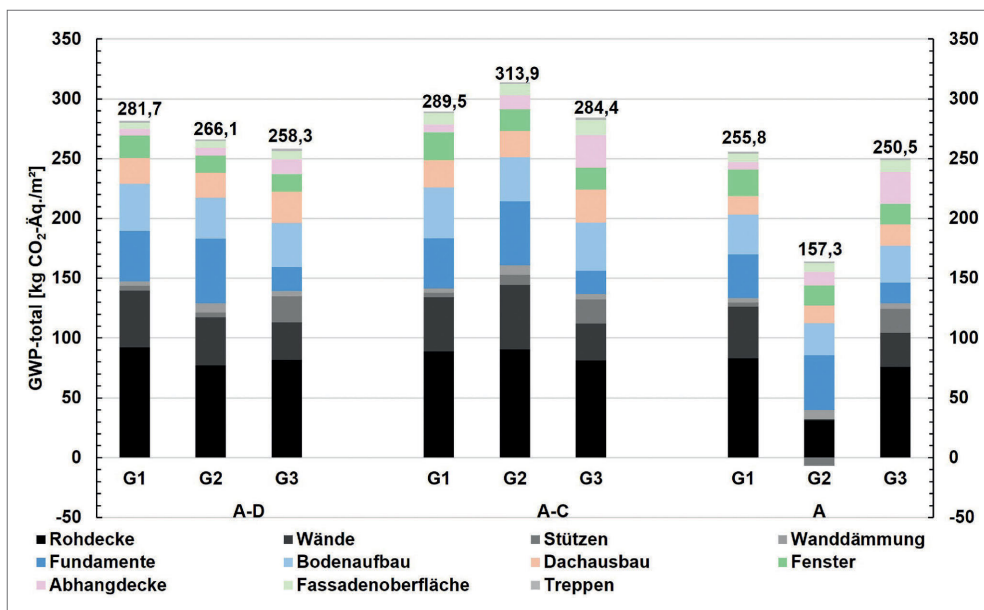


Bild 4. GWP-total pro m² Nutzfläche der Gebäude G1 bis G3, differenziert nach Bilanzierungsszenarien und Bauteilgruppen
 Grafik: RPTU
 Fig. 4. GWP-total per m² of usable floor space in buildings G1 to G3, differentiated by scenarios and component groups
 Source: RPTU

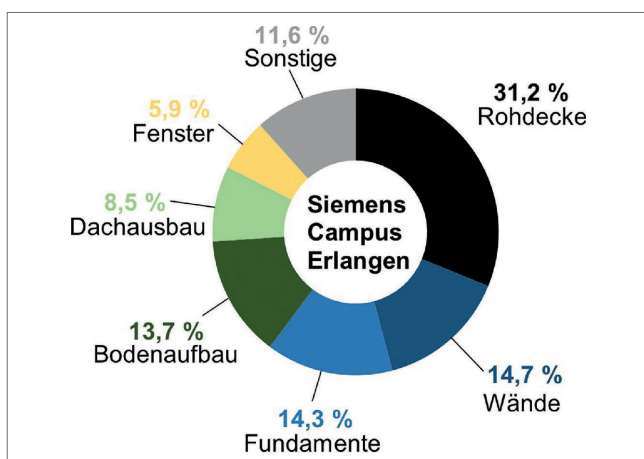


Bild 5. Anteile der Lebenszyklusphasen (A-D) am GWP-total pro m² Nutzfläche: Durchschnittswerte der Referenzgebäude G1 bis G3
 Grafik: RPTU
 Fig 5. Proportion of life cycle phases (A-D) in total GWP per m² of usable floor space: Average values for buildings G1 to G3
 Source: RPTU

4 Ergebnisse der Ökobilanzierung

4.1 Gebäudevergleich

Die folgenden Ergebnisse zeigen den quantitativen Vergleich der Grauen Emissionen je m² Nutzfläche anhand des Indikators GWP-total unter Berücksichtigung der definierten Systemgrenzen. Die Bezugsfläche wurde für dieses Forschungsprojekt in Anlehnung an die SRE-Richtlinie [1] von Siemens und abweichend von der DAfStb-Richtlinie [2] vorgegeben. Der Gesamtgebäudevergleich in **Bild 4** umfasst alle bilanzierten Bauteilgruppen und differenziert zwischen den Bilanzierungsszenarien Cradle to Site (A), Cradle to Grave (A-C) und Cradle to Cradle (A-D).

Im Gesamtgebäudevergleich des Szenarios A-D wird ersichtlich, dass insgesamt 82 % bis 93 % des GWP-total in Summe durch die Bauteilgruppen Rohdecke, Wände, Fundamente, Bodenaufbauten, Dachausbau und Fenster verursacht werden (**Bild 5**).

Die Position Rohdecke entspricht rund einem Drittel des GWP-total (A-D). Diese sechs Positionen können damit für alle

Konstruktionsweisen als relevanteste Treiber des GWP innerhalb der untersuchten Büroimmobilien identifiziert werden. Bei G3 zeigt sich zudem in allen Szenarien ein erhöhter Anteil der Stützen am Gesamtergebnis, was der primären Verwendung von Baustahl geschuldet ist. Sowohl im Szenario A-D als auch A erzielt G1 mit 281,7 beziehungsweise 255,8 kg CO₂-Äq./m² das höchste GWP-total der drei Gebäude. Das GWP von G3, welches in diesen beiden Szenarien mit dem geringsten Gesamtergebnis abschneidet, weist jedoch mit einer maximalen Differenz von bis zu 9 % (A-D) keine erhebliche Reduktion gegenüber G1 auf. Im Szenario A-D ordnet sich G2 im Mittelfeld ein, während mit den Bilanzgrenzen A-C der größte absolute GWP-Wert von 313,9 kg CO₂-Äq./m² hervorgerufen wird. Bei exklusiver Berücksichtigung der Herstellungsphase (A1-A3) wiederum halbiert sich das GWP-total von G2 auf den insgesamt kleinsten Einzelwert. Diese Inkohärenz ist durch die Erfassung der biogenen Kohlenstoffspeicherung und entsorgungsbedingten Wiederfreisetzung in Holzwerkstoffen von unterschiedlicher Vollständigkeit sowie der Anrechenbarkeit energetischer Vorteile aus der Verwertung begründet [8, 19].

4.2 Bauteilvergleich

4.2.1 Allgemeines

Im Sinne einer detaillierteren Betrachtung werden für das Referenzbilanzierungsszenario A-D nachfolgend die Grauen Emissionen der einzelnen Bauteilgruppen Rohdecken, Stützen und Wände inklusive Wanddämmung dargestellt. Als zugehöriges Zwischenergebnis der Sachbilanz wird der absolute Verbrauch der Baustoffe der Deckensysteme wiedergegeben. Anhand dieser Positionen werden die Auswirkungen auf die Grauen Emissionen der verschiedenen Deckensysteme und des daran anschließenden vertikalen Tragwerks als wesentliches Unterscheidungsmerkmal der drei untersuchten Gebäude ersichtlich. Die Wanddämmung als einzig nichttragende Bauteilgruppe wird als Bestandteil der Gebäudehülle, deren Ausgestaltung direkt von der Materialität der tragenden Wände abhängig ist, zur Betrachtung bauartspezifischer Vor- und Nachteile ebenfalls dargestellt. Im Gegensatz dazu sind die übrigen Bauteilgruppen wie zum Beispiel Bodenaufbau, Fens-

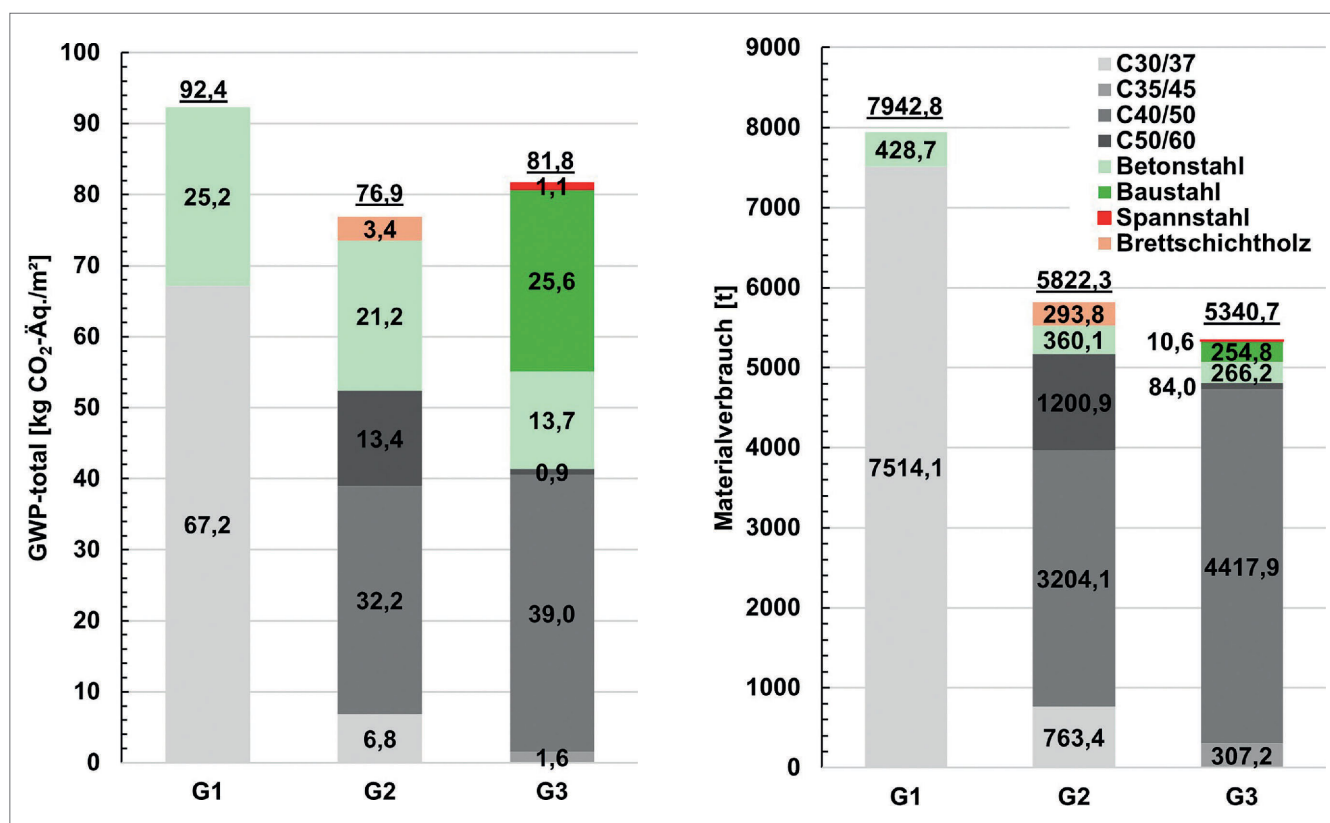


Bild 6. GWP-total (links) und Materialverbrauch (rechts) der Deckensysteme in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D Grafik: RPTU
 Fig. 6. GWP-total (left) and material consumption (right) for ceiling systems in buildings G1 to G3, scenario A-D Source: RPTU

ter, Dachausbau weitgehend unabhängig von der gewählten Tragstruktur durchgebildet und werden trotz teilweise größeren GWP-Ergebnissen nicht gesondert diskutiert. Die vorgefundenen Unterschiede in der Gründung der Gebäude entspringen primär baubetrieblichen Abwägungen und zeigen keine direkte Abhängigkeit von den verschiedenen Gesamtmassen der Gebäude auf. Folglich wird hierauf in der vorliegenden Veröffentlichung, die sich auf konstruktions- und materialspezifische Unterschiede der Gebäude konzentriert, nicht näher eingegangen.

4.2.2 Rohdecken

Die Gegenüberstellung von Masse und GWP-total am Beispiel der Deckensysteme in **Bild 6** verdeutlicht einen starken Einfluss bestimmter, emissionsintensiver Materialien. So erbringen die Rohdecken in G1 mit knapp 8 000 t signifikant mehr Masse als in den anderen beiden Gebäuden. Durch den Einsatz einer vergleichsweise niedrigen und damit zementärmeren Betondruckfestigkeitsklasse reduziert sich dieser Abstand bei Betrachtung des GWP-total in Bild 6 allerdings signifikant. In den Rohdecken von G1 wurde ausschließlich die Betonfestigkeitsklasse C30/37 eingesetzt, während in den übrigen Deckensystemen, auch bedingt durch die Fertigteilbauweise, höhere Festigkeiten bis hin zu C50/60 eingesetzt wurden. Dennoch erreicht die Ortbetonflachdecke in G1 mit 92,4 kg CO₂-Äq./m² das größte GWP-total. Obgleich in G3 trotz erhöhter Nutzfläche am wenigsten Masse in den Decken verbaut wurde, ergibt sich ein höheres GWP-total als für die schwereren Decken in G2. Als signifikanter GWP-Treiber ist hierbei der Baustahl in den Decken von G3 zu nennen, während G2 vom Anteil an Brettschichtholz (BSH) in den Holz-

ton-Verbunddecken profitiert. Im direkten Vergleich mit BSH emittiert der Baustahl bei nahezu identischer Masse mehr als das Siebenfache an CO₂-Äquivalenten.

4.2.3 Stützen

Die Analyse der Grauen Emissionen der Stützen (**Bild 7**) unterstreicht die ökologische Relevanz der Materialwahl. Trotz nahezu identischer Massen von jeweils circa 300 t in allen drei Modulen treten bei der Verwendung von Stahlstützen gravierende Unterschiede in der Bilanz auf. Die Stützen von G3 verursachen aufgrund des hohen Stahlanteils etwa das Fünffache der Grauen Emissionen im Vergleich zu den anderen Konstruktionsweisen. Die Ausbildung der Stützen in Ortbeton- bzw. teilweiser Holzbauweise in G1 und G2 führt mit rund 4 kg CO₂-Äq./m² zu einem insgesamt vernachlässigbaren Ergebnis für die Bauteilgruppe, wobei das durch Stützen verursachte GWP-total von 21,9 kg CO₂-Äq./m² auch bei Betrachtung des Gesamtgebäudes G3 eine relevante Position darstellt. Auch in diesem Vergleich wird deutlich, wie entscheidend die Wahl der Baustoffe ist und die Bilanzierung signifikant beeinflusst; auch welches große Potenzial die Verwendung von „grünem“ Beton und Stahl hinsichtlich einer CO₂-Reduzierung haben.

4.2.4 Wände und Wanddämmung

Die vertikal abtragende Baustruktur wird neben den Stützen durch die Darstellung der Grauen Emissionen der Wände in **Bild 8** vervollständigt. G1 verzeichnet hierbei trotz zonierter Bauweise wegen der Verwendung hoher Betondruckfestigkeiten

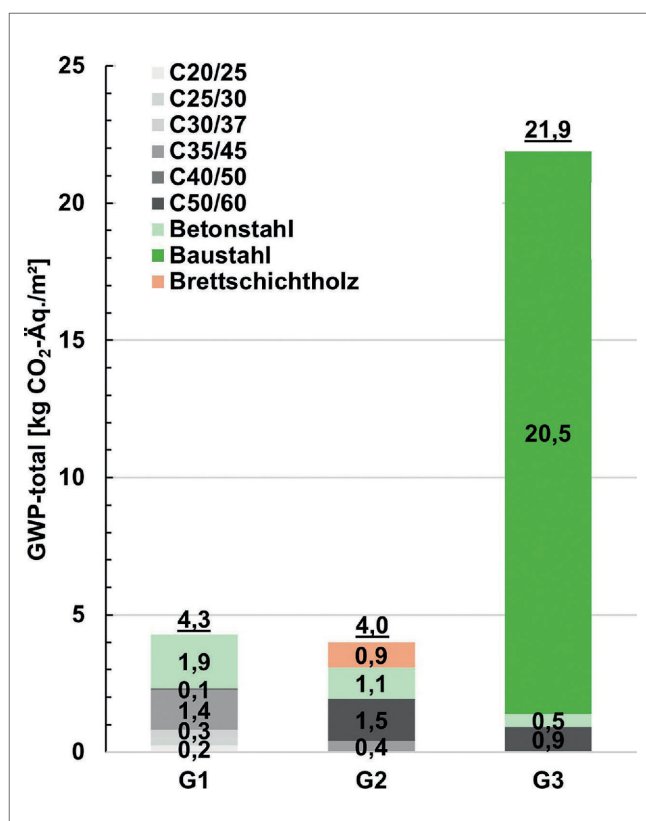


Bild 7. GWP-total der Stützen in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D Grafik: RPTU
 Fig. 7. GWP-total of columns in buildings G1 to G3, scenario A-D Source: RPTU

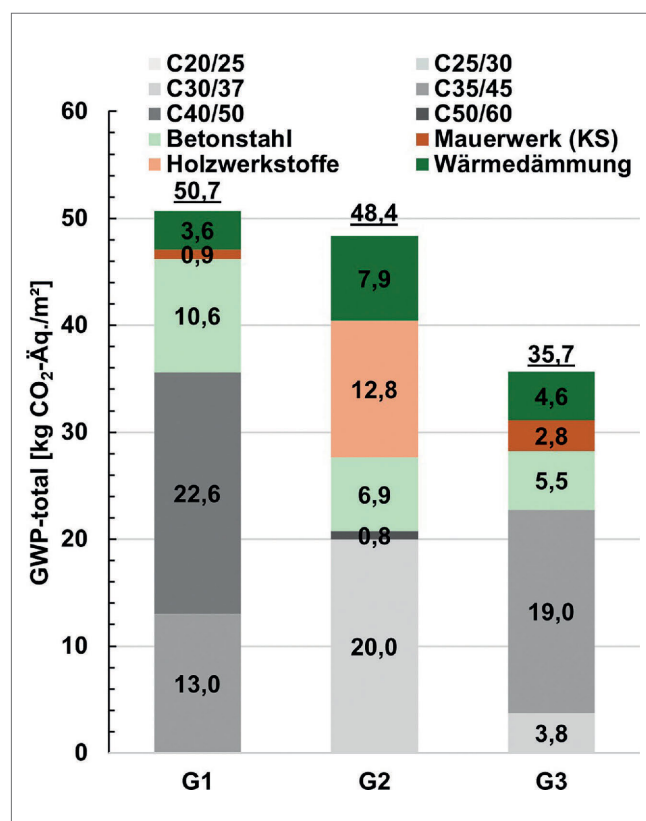


Bild 8. GWP-total der Wände inkl. Dämmung in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D Grafik: RPTU
 Fig. 8. GWP-total of walls incl. insulation in buildings G1 to G3, scenario A-D Source: RPTU

mit 50,7 kg CO₂-Äq./m² das Maximum. Die überwiegend in Holzständerwandkonstruktion ausgeführten Wände von G2 ordnen sich mit 48,4 kg CO₂-Äq./m² ins Mittelfeld ein. Stahlbetonwände sind hier vor allem im Bereich der aussteifenden Gebäudekerne vorzufinden. In G3 kommen relativ wenige Stahlbetonwände aus nur mittleren Festigkeitsklassen vor, sodass sich mit 35,7 kg CO₂-Äq./m² das Minimum dieser Position ergibt. Möglicherweise konnte bei G3 der Umfang tragender Wände durch hohe Tragfähigkeiten der Stahlstützen reduziert werden.

Die Grauen Emissionen im Bereich der Wanddämmung variieren zwischen 3,6 und 7,9 kg CO₂-Äq./m². Wie Bild 8 verdeutlicht, markiert G2 hierbei den oberen Grenzwert. Die signifikante Abweichung von bis zu 211 % resultiert primär aus den grundverschiedenen Konstruktionsaufbauten. Während G1 und G3 ein konventionelles Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit einer reinen Außendämmung nutzen, kommt in G2 eine Holzständerbauweise zum Einsatz. Bei dieser wurde der Hohlraum der Tragstruktur zusätzlich zur äußeren Dämmschicht vollständig mit Dämmmaterial gefüllt. In Kombination mit teilweise gedämmten Innenbereichen führt dies in G2 zu einem deutlich höheren Materialeinsatz, was sich unmittelbar in der Ökobilanz widerspiegelt.

5 Bewertung und Empfehlungen

5.1 Konstruktionsweisen

Die detaillierte Analyse der Grauen Emissionen der drei untersuchten Bürobauten als Stahlbetonskelettbau, als Holz-Beton-Hy-

bridbau und als Stahlbetonsystembau ermöglicht eine fundierte Bewertung der ökologischen Vor- und Nachteile der verschiedenen Konstruktionsweisen. Bild 4 veranschaulicht die Unterschiede innerhalb der Szenarienbetrachtung.

Bemerkenswert ist, dass trotz unterschiedlicher Konstruktionsweisen, welche auf Materialien mit grundverschiedenem Treibhausgaspotenzial beruhen, die Gesamtergebnisse auf Gebäudeebene im Schwerpunktszenario A-D um weniger als 10 % voneinander abweichen. Die Größenordnung dieser Unterschiede ist angesichts der vorgefundenen Daten- und Modellierungsunsicherheiten als sehr gering einzustufen. Folglich kann in diesem Betrachtungsszenario keine der Konstruktionsweisen mehr als eine andere empfohlen werden, vielmehr kommt es darauf an, aus welchen spezifischen Materialvarianten die jeweilige Konstruktionsweise hergestellt wird und dass diese optimiert geplant und umgesetzt werden. Die verwendeten Materialien sowie die Tragwerksplanung sind hier von zentraler Bedeutung. Beispielsweise würde die Verwendung von Ökobetonen mit reduzierten Grauen Emissionen oder „green steel“ die Gesamtergebnisse mehr beeinflussen als die Konstruktionsweise selbst. Daher werden zukünftige Entwicklungen im Bereich der Ökobetonen auch darüber entscheiden, ob es aus Sicht der Grauen Emissionen vorteilhafter ist, Decken aus Ort beton mit tendenziell geringerer Festigkeit oder Decken als Betonfertigteilen mit Anforderungen an die Frühfestigkeit herzustellen. Jedoch ist zu beachten, dass die Betone in der Studie bedingt durch die Datengrundlage lediglich anhand der Druckfestigkeitsklassen und nicht in höherer Detaillierung nach Rezepturen oder Herstellverfahren unterschieden wurden und das

Bilanzierungsergebnis dies somit nicht differenziert abbilden kann.

5.2 Bedeutung der Systemgrenze in Abhängigkeit der Datensätze

Die größten Schwankungen sowohl je Gebäude als auch im Vergleich der Gebäude untereinander geht bei Mitbetrachtung der Szenarien A und A-C mit der Wahl der Bilanzgrenzen einher. Beispielsweise profitieren Holzwerkstoffe ökobilanziell stark von einer erheblichen Gutschrift durch angenommene Einsparungen anderer Energieträger in Lebenszyklusphase D, welche direkt aus der ökologisch zu hinterfragenden thermischen Verwertung in Phase C3 resultiert. Zum Bilanzierungszeitpunkt können Aussagen zur Materialverwertung in der zukünftigen Entsorgungsphase sowie deren Auswirkungen auf den Energiesektor jedoch nur reine Prognosen darstellen, während zur bereits abgeschlossenen Herstellungsphase eine breite Datengrundlage vorliegt. Dahingegen enthalten beispielsweise die generischen Datensätze, welche für die Bilanzierung der Betone zum Ansatz kamen, keine negativen GWP-Anteile zur Berücksichtigung der CO₂-Aufnahme im Zuge der Karbonatisierung.

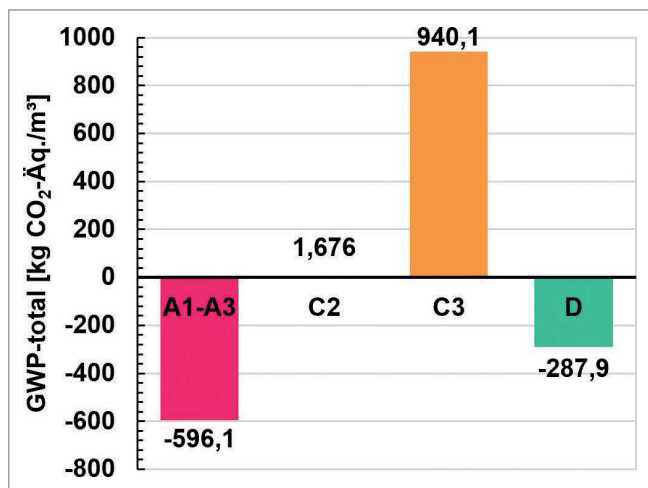


Bild 9. Gewählter generischer Datensatz für Brettschichtholz Grafik: [20]
Fig. 9. Selected generic data set for laminated timber Source: [20]

Bild 9 veranschaulicht, dass bei Aufsummieren aller verfügbaren Lebenszyklusphasen (A–D) lediglich rund 60 kg CO₂-Äq./m³ für Brettschichtholz anfallen, da sich die biogene Kohlenstoffspeicherung in A1-A3, das Freiwerden u.a. dieses Kohlenstoffs in der Entsorgungsphase C3 und die Gutschrift in Phase D nahezu vollständig ausgleichen. Berücksichtigt man nur A-C, wird lediglich die Gutschrift in D vernachlässigt und es fallen mehr als 340 kg CO₂-Äq./m³ an, was in etwa dem GWP-total eines m³ Beton C50/60 gleich kommt. Dessen GWP entstammt allerdings zu rund 95 % der Herstellungsphase A1-A3, wo sich beim Brettschichtholz ein negativer Wert ergibt, sodass auch Cradle to Site kein objektives Vergleichsszenario bei Vorkommen dieser beiden Materialien darstellt.

Ebenfalls ist eine Beeinflussung des Szenarienvergleichs durch die Wahl des Datensatzes für Betonstahl möglich. Der generische Datensatz [21] nimmt die Produktion im Elektrostahlwerk durch Einschmelzen von Schrott an, sodass bereits in der Herstellungsphase A1-A3 und nicht erst in Phase D im-

plizit eine Gutschrift durch Recycling des Rohmaterials enthalten ist [22].

5.3 Einfluss der Datensätze

Bezüglich der Vergleichbarkeit der Endergebnisse ist zudem die Unvollständigkeit der verwendeten Datensätze hervorzuheben; Bild 3 zeigt diese Lückenhaftigkeit auf. Problematisch an nicht vorhandenen Lebenszyklusdaten ist, dass diese in die Gesamtbilanz mit Null eingehen müssen, das Bilanzergebnis also limitieren und damit gegebenenfalls eine nicht zutreffende Einhaltung einer Benchmark herbeiführen könnten. Aufgrund der Verschiedenheit der eingesetzten Materialien und damit angesetzten Datensätzen für die unterschiedlichen Gebäude und Konstruktionsweisen kann sich die Unvollständigkeit der Datensätze bestimmter Materialgruppen ungleichmäßig auswirken. Dem wird entgegengewirkt, indem schwerpunktmäßig auf generische Datensätze, die einer Qualitätskontrolle unterliegen und die relevantesten Stoffströme abbilden müssen, zurückgegriffen wurde. Bezüglich dieses Datensatztyps ist erwähnenswert, dass in deren Modellierung Sicherheitszuschläge zwischen 10 % und 30 % vorgenommen werden. Im Hinblick auf den Indikator GWP-total betrifft dies die Anteile GWP-fossil und GWP-luluc, nicht aber den biogenen Anteil des GWP. Dieser Umstand hemmt die Vergleichbarkeit der Konstruktionsweisen bei Verwendung mineralischer, metallischer und hölzerner Baustoffe, deren GWP-Anteile grundverschieden in diesen Kategorien verteilt sind. Dennoch bietet der einheitliche Ansatz generischer Datensätze eine verbesserte Objektivität und erhöhte Transparenz gegenüber der Auswahl spezifischer Datensätze, die einen abweichenden Umfang an Lebenszyklusdaten enthalten und von Interessen der Hersteller an Repräsentation und Marktanteilen geprägt sein könnten. Darüber hinaus konnte in der Massenermittlung nicht jedem Bauelement das korrekte Produkt zugeordnet werden und eine Vielzahl von Produkten verfügen noch nicht über gültige EPDs.

Abschließend ist festzuhalten, dass der im Forschungsprojekt im Sinne der Vergleichbarkeit gewählte Ansatz generischer Datensätze für die emissionstreibenden Baustoffe Beton und Stahl zur Folge hat, dass auch keine positive Auswirkung der Nutzung von ökologischeren Materialalternativen wie „Ökobetonen“ oder „green steel“ im Bilanzergebnis abgebildet werden kann. Im konkreten Projekt ist dies allerdings sehr empfehlenswert, daher können die vorliegenden Ergebnisse von den tatsächlichen Werten der analysierten Gebäude unter Verwendung projektspezifischer Datensätze abweichen. Zugleich zeigen die erheblichen Anteile insbesondere von Beton und Bau- beziehungsweise Bewehrungsstahl an den Gesamtergebnissen Hebel zur Senkung der Grauen Emissionen durch Materialoptimierung auf. Diese Potenziale sollten gehoben werden und können sich stärker auswirken als die geringen Unterschiede, die in den vorliegenden Untersuchungen mit Fokus auf die Konstruktionsweise erzielt wurden.

5.4 Dokumentationsanforderungen

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, ließ die Heterogenität der BIM-Modelle bezüglich Vollständigkeit der Attribuierung die Anwendung entsprechender Bilanzierungstools nur bedingt zu. Daher sollten zukünftig bereits im Zuge von Ausschreibung und Vergabe einheitliche Dokumentationsanforderungen gestellt werden, die eine lückenlose Durchführbarkeit der Massenbilanz und

damit der Ökobilanzierung gewährleisten. Angaben zu den verbauten Volumina, welche aus der Projektkalkulation vorhanden sein müssen, sollten strukturiert, vollständig und entsprechend der Ausführungsplanung abgelegt werden. Insbesondere im Kontext verschiedener Betonfestigkeitsklassen, welche mit steigenden Zementgehalten erhöhten Einfluss auf das Bilanzierungsergebnis des GWP-total nehmen, müssen BIM-Modelle vollständig und stringent attribuiert werden. Auch Bewehrungsgehalte von Stahlbetonbauteilen sollten prioritär hinterlegt werden.

Da die Abgrenzung von Bauteilgruppen in Abhängigkeit des Projekts und Untersuchungsziels variieren und von den in dieser Studie verwendeten Bilanzierungskategorien abweichen können, sollten Bauteile in BIM-Modellen zudem funktionellen Bauteilkategorien und Kostengruppen zugeordnet werden. Durch die Anwendbarkeit von Filtern können Bauteillisten effektiv und vollständig erstellt und direkt der Massenbilanz zugeführt werden. Die Ergänzung einer individuellen Bauteil-ID sowie die Attribuierung der zugehörigen Plannummer beugt Missverständnissen und damit Bilanzierungsfehlern vor.

Jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass in den verwendeten BIM-Modellen Attribuierungen vorhanden waren, die nicht vollständig abgerufen werden konnten. Hier gilt es, die Verwendung von Open BIM zu stärken, um die Kompatibilität der Modelle mit verschiedener Software zu verbessern. Da allerdings bereits bei verschiedenen Versionen derselben Software nach wenigen Jahren Kompatibilitätsprobleme offenkundig wurden, ist eine zusätzliche Dokumentation der wesentlichen Eigenschaften der relevantesten Bauteilgruppen, wie in Abschnitt 4 erläutert, außerhalb von Modelldateien zu empfehlen.

5.5 Empfehlungen zur Ausschreibung emissionseffizienter Gebäude

Im Vergleich der verschiedenen Konstruktionsweisen hat sich gezeigt, dass deren Auswirkungen auf das GWP-total des Gesamtgebäudes im Referenzszenario Cradle to Cradle gering sind. Dies impliziert, dass eine funktionelle Ausschreibung ohne Vorgabe einer vermeintlich ökologisch vorteilhaften Konstruktionsweise zielführend sein kann. Die vertragliche Festlegung einer GWP-Obergrenze, wie durch Siemens beim „Modul 8“ am SCE umgesetzt, motiviert alle Planenden und Ausführenden zu einer Optimierung der Grauen Emissionen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und liefert systemimmanent eine transparente, bilanzierungsgerechte Dokumentation der verbauten Massen und Volumina. Eine Beschränkung auf die Vorgabe des Zielwerts ohne Vorgaben zu den Konstruktionsweisen lässt dabei Raum für Optimierung in der Planung und Ausführung, die gesamtheitlich betrachtet und vergeben werden sollten und bei denen die Expertise aller Fachunternehmen genutzt werden sollte.

6 Fazit

Die vorliegende Veröffentlichung zeigt die Vorgehensweise und Ergebnisse der vergleichenden Bilanzierung der Grauen Emissionen dreier Büneubauten unterschiedlicher Konstruktionsweisen für verschiedene Bilanzierungsszenarien anhand überwiegend generischer Datensätze aus der Ökobaudat. Die Bilanzierungsergebnisse werden auf Gebäudeebene als auch für ausgewählte, relevante Bauteilgruppen gegenübergestellt und wissenschaftlich bewertet.

Als wesentliches Resultat der vergleichenden Studie konnte gezeigt werden, dass die äußerlich nahezu identischen drei Büneubauten in den unterschiedlichen Konstruktionsweisen Stahlbetonskelettbau, Holz-Beton-Hybridbau und Stahlbetonsystembau im Referenzszenario A-D keine signifikant verschiedenen Graue Emissionen aufweisen. Vielmehr entscheidend sind die verwendeten Materialmengen, -arten und -güten, dabei stellen Beton und Bau- bzw. Bewehrungsstahl aufgrund ihres großen Anteils am Gesamtergebnis auf Gebäudeebene aller drei Konstruktionsweisen den wesentlichen Hebel zur Senkung der Grauen Emissionen dar. Dies unterstreicht die Bedeutung der ressourcenoptimierten Tragwerksplanung mit effizienten Systemen sowie die Weiterentwicklung emissionsärmerer, ökologischerer Baustoffrezepturen oder Herstellungsverfahren [23, 24]. Im Sinne der Nutzung der Potenziale zur Reduktion der Grauen Emissionen sind daher funktionale Wettbewerbe und Ausschreibungen mit Vorgabe von GWP-Obergrenzen oder -Zielen zur tragwerksplanerischen Optimierung anstelle der Vorgabe bestimmter Konstruktionsweisen zu bevorzugen. Dabei sind spezifische Dokumentationsanforderungen zur transparenten Bilanzierung und dem Nachweis der Grauen Emissionen einzuhalten.

Entsprechend bisheriger Forschung und Erfahrungen kann auch bei allen drei analysierten Beispielgebäuden der Bauteilgruppe der Rohdecken das absolut größte GWP-total zugeordnet werden; ihr Anteil liegt im Bereich von 20 %-33 % der Gesamtbilanz. Dabei ist bemerkenswert, dass auch dem Bodenaufbau aus Estrichen und Hohlbodensystemen ein vergleichsweise bedeutender Anteil an Grauen Emissionen zugerechnet werden kann. Zusammenfassend zeigt sich, dass bereits mit den marktverfügbaren Baustoffen und Konstruktionsweisen großes Potenzial zur Senkung der Grauen Emissionen genutzt werden kann, sofern entsprechende Anreizmechanismen gesetzt werden.

DANKSAGUNG

Abschließend möchten die Autor:innen der Siemens Real Estate für das Interesse und die Mitwirkung an den Untersuchungen sowie die finanzielle Förderung des gemeinsamen Projekts danken.

LITERATUR

- [1] Siemens Real Estate: Sustainability Standard – for Development, Construction & Major Renovation Projects. (Internes Dokument). Siemens AG, 2023.
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAFStb-Richtlinie Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton. Ausgabe August 2024.
- [3] Krause, K.; Hartmann, C.; Hafner, A.: Eine Ökobilanz, viele Ergebnisse – Ergebnis und Vergleich der Ökobilanz desselben Einfamilienhauses durch verschiedene Bearbeitende. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 11, S. 326-336. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-11-56.
- [4] Zitterl, T.; Bauer, P.: Ökologische Optimierung von Tragwerken im Infrastrukturbau am Beispiel von Brücken und Portalkonstruktionen. In: Bauingenieur 99 (2024), Heft 10, S. 317-326. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-53.
- [5] Hoppe, J.; Sanio, D.; Hormel, A. et al.: CO₂-Bilanzierung bei Straßenbrücken – Ein Bewertungsansatz für die Planungsphase von Baumaßnahmen. In: Bauingenieur 99 (2024), Heft 11, S. 354-365. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-11-40.

- [6] Görtz, S.; Bardenhewer, E.K.; Volkenhoff, T. et al.: CO₂-Emissionen von Infrastrukturprojekten im Straßenbau. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 03, S. 62-72. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-03-56.
- [7] Siemens AG: Siemens Campus in Erlangen, 2025, <https://press.siemens.com/de/de/feature/siemens-campus-erlangen> [Zugriff am: 20.02.2026].
- [8] Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R. et al.: Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. In: Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021), Heft 12, S. 969-977. doi.org/10.1002/best.202100065.
- [9] Heckmann, M.; Glock, C.: Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme. In: Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023), Heft 2, S. 110-123. doi.org/10.1002/best.202200102.
- [10] Heckmann, M.; Glock, C.: Graue Emissionen von Hochbaudeckensystemen – Praxis-Umfrage und Hintergründe zur neuen DAfStb-Richtlinie. In: Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 22-32. doi.org/10.1002/best.202400076.
- [11] Haist, M.; Glock, C.; Wiens, U. et al.: Die neue DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ – Meilenstein für den Klimaschutz. In: Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 55-59. doi.org/10.1002/best.202400090.
- [12] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Ausgabe Februar 2021.
- [13] DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. Ausgabe Februar 2021.
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC Sixth Assessment Report – Chapter 7: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021, www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/ [Zugriff am: 27.02.2026].
- [15] DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. Ausgabe März 2022.
- [16] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat, www.oekobaudat.de/ [Zugriff am: 24.09.2024].
- [17] Figl, H.; Kusche, O.: Ökobaudat-Handbuch – Technisch/formale Informationen und Regeln zur Ökobaudat-Datenbank. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin, Wien, Freiburg, 2.1 Ausgabe 2023.
- [18] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat Datenlieferanten, www.oekobaudat.de/anleitungen/datenlieferanten.html [Zugriff am: 20.02.2026].
- [19] Heckmann, M.: Entwicklung eines Benchmarksystems für die Grauen Emissionen von Deckensystemen, DIN Media GmbH; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Dissertation.
- [20] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat – Prozess-Datensatz: Brettschichtholz Nadelholz (generisch), https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c816b036-6bdf-48e5-8ef8-a76d7872f589&version=20.23.050&stock=OBD_2023_1&lang=de [Zugriff am: 26.02.2026].
- [21] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat – Prozess-Datensatz: Bewehrungsstahl (generisch), <https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uu>
id=8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3&version=20.23.050&stock=OBD_2023_1&lang=de.
- [22] Bielak, J.; Ros, H.; Hiester, M.: Ressourceneffiziente Gebäudehülle durch nichtmetallisch bewehrte Sandwichfassaden – Von der Forschung zum Pilotprojekt. In: Bauingenieur 101 (2026), Heft 03, S. 41-51. doi.org/10.37544/0005-6650-2026-06.
- [23] Bayer, D.; Berns, K.; Carrigan, S. et al.: Building the Future – an interdisciplinary research initiative/Bauen der Zukunft – eine interdisziplinäre Forschungsinitiative. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 10, E 1-E 10. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-10-41.
- [24] Hegger, J.; Glock, C.; Curbach, M. et al.: Innovativer Betonbau – Tradition und Zukunft. In: Bauingenieur 100 (2025), 07-08, S. 181-195. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-07-08-15.

Rebecca Müller, M.Sc.

rebecca.mueller@rptu.de

Aaron Dernbach, M.Sc.

aaron.dernbach@rptu.de

Daniel Jochum, M.Sc.

daniel.jochum@rptu.de

Erik Wagner, M.Eng.

erik.wagner@rptu.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Christian Glock

christian.glock@rptu.de

Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion
Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)