

„Graue“ CO₂-Emission typischer Wohngebäude

Die zentrale Rolle des Bauwesens beim Klimaschutz

Nach aktuellem Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass mehr als 50 % der weltweiten CO₂-Emissionen auf den Bausektor zurückzuführen sind [1]; hiervon entfallen ca. zwei Drittel auf Hochbauwerke. Dem Bauwesen, speziell dem Hochbau, kommt daher eine zentrale Bedeutung bei der Abwendung der Klimakatastrophe zu. | [Stephan Görtz](#), [Thi Kim Kung Pham](#), [Finn-Lasse Graage](#)

28



Die „graue Emission“ hat einen enormen Einfluss auf den gesamten CO₂-Ausstoß. Dennoch fehlen Planern, Bauherren und Ausführenden, die an „normalen“ Standardbauwerken beteiligt sind, im Regelfall Erfahrungswerte und damit auch Steuerungsmethoden, um die CO₂-Emissionen zu optimieren.

baisa/AdobeStock

➤ Bisherige CO₂-Einsparungen haben sich vornehmlich auf den Energieverbrauch während des Gebäudebetriebs konzentriert. Basierend auf dem Energieeinspargesetz aus dem Jahr 1976 wurden 1998 zunächst die Wärmeschutzverordnung und ab 2002 die Energieeinsparverordnung (EnEV) eingeführt, die regelmäßig (2004, 2007, 2009, 2014, 2016) aktualisiert und 2020 durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG) abgelöst wurde. Diese Regelungen zielen jedoch ausschließlich auf den Betrieb von Gebäuden ab. Hierdurch sind die energetischen Standards in Bezug auf

die Gebäudehülle inzwischen so hoch, dass aus dem Gebäudebetrieb zukünftig nur noch wenige weitere CO₂-Einsparungen zu erwarten sind. Daher rücken die CO₂-Emissionen, die aus der Errichtung des Bauwerks (bzw. seiner Unterhaltung und dem späterem Rückbau) resultieren, die sogenannten „grauen Emission“, zunehmend in den Fokus.

Trotz des enormen Einflusses der „grauen Emission“ auf den gesamten CO₂-Ausstoß fehlen Planern, Bauherren und Ausführenden, die an „normalen“ Standardbauwerken beteiligt sind – und zu diesen gehören schätzungs-

weise 80 – 90 % des gesamten Bauvolumens –, im Regelfall Kenntnisse bzw. Erfahrungswerte und damit auch Steuerungsmethoden, um die CO₂-Emissionen zu optimieren. Gleichzeitig werden allerdings Begriffe wie Nachhaltigkeit und CO₂-Reduzierung – wie aktuell in allen Bereichen des Lebens, wie ein kurzer Blick in die Fernsehwerbung zeigt – fast inflationär verwendet. Bewertungsverfahren zur Nachhaltigkeit nach DGNB bzw. BNB und ihre zunehmende Verbreitung sind sicherlich ein guter Schritt; da die CO₂-Bilanz in deren ganzheitlicher Betrachtungsweise der Nachhaltigkeit allerdings nur zu 3,75 % einfließt, stellt sich die Frage, ob diese Bewertungsverfahren allein zur Abwehr der drohenden Klimakatastrophe ausreichend sind.

Gemäß dem Sachverständigenrat für Umweltfragen steht Deutschland zur Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaabkommens ein CO₂-Restbudget von 4 Gigatonnen zur Verfügung [2]. Basierend auf einer Abschätzung des anstehenden Bauvolumens ist von Weidner/Sobek et. al. in [3] errechnet worden, dass für Bauwerke (Baukonstruktion inkl. technischer Anlagen) je Kubikmeter Brutto-Rauminhalt (m³ BRI) lediglich ca. 32 kg CO₂ verbraucht werden dürften. Um diesen Wert einzuordnen, wurden an der Hochschule Kiel für typische Standardwohngebäude CO₂-Bilanzen durchgeführt, um eine Abschätzung treffen zu können, wieviel CO₂/m³ BRI aktuell bei konventionellen Bauweisen emittiert wird und was die Haupt-CO₂-Treiber sind [4]. Neben den eigenen Untersuchungen wurden in der Literatur dokumentierte Berechnungen [5, 6] einbezogen.

Untersuchungsumfang bei Wohngebäuden

Im Hinblick auf eine repräsentative Datenbasis wurden für die durchgeführte Untersuchung gezielt Wohngebäude ausgewählt, die einerseits typische Standardbauwerke repräsentieren, sich andererseits im Hinblick auf eine möglichst breite Datenbasis dennoch voneinander unterscheiden. Durch Variation der Eingangsparameter bzw. Bauweisen wurden insgesamt 16 Wohngebäude generiert, für die die CO₂-Emissionen für das Bauwerk ermittelt wurden. Im Einzelnen handelte es sich um die folgenden Gebäudetypen:

A) Mehrfamilienhaus

Hierzu wurde das „Typengebäude“ der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (ARGE) ausgewählt, das speziell für allgemeine Untersuchungen konzipiert wurde. Dieses stellt kein auf Einzelauswertungen beruhendes Beispielgebäude dar, sondern spiegelt vielmehr das auf Grundlage von Statistiken und Marktbeobachtungen bestimmte Mittel für den optimierten Wohnungsbau in der derzeitigen Baupraxis wider [7]. Die wesentlichen Parameter sind:

- › fünfgeschossiges Gebäude mit Holzflachdach, verputzten Fassaden und ohne Keller (siehe Abb. 1 oben),



Abb. 1, oben: Ansicht betrachtetes Typengebäude der ARGE (entnommen aus [7])

- › Nutzung durch 12 Wohneinheiten im mittleren Qualitätssegment, durchschnittliche Wohnungsgröße 73 m² mit drei bis vier Wohnräumen je Wohneinheit,
- › Grundabmessungen L/B = 17,8 / 13,6 m, Gebäudehöhe ca. 13 m, Brutto-Rauminhalt (BRI) 3.600 m³
- › Es wurden folgende Bauweisen variiert:
 - Massivbau mit Außenwänden und tragenden Innenwänden aus Kalksandstein, Stahlbetondecken und Holzdach,
 - Massivbau mit Außenwänden aus Poroton, tragenden Innenwänden aus Kalksandstein, Stahlbetondecken und Holzdach,
 - Massivbau mit Außenwänden aus Porenbeton, tragenden Innenwänden aus Kalksandstein, Stahlbetondecken und Holzdach,
 - Massivbau mit Außenwänden aus Ort beton, tragenden Innenwänden aus Kalksandstein, Stahlbetondecken und Holzdach und
 - Hybridbau mit Außenwänden und tragenden Innenwänden aus Holz, Holz-Beton-Verbunddecken und Holzdach.

B) Unterkunftsgebäude

Hierzu wurde von der Gebäudemanagement Schleswig-Holstein AöR (GMSH) ein konkretes Standard-Unterkunftsgebäude zur Verfügung gestellt (siehe Abb. 1 unten); die Planung und begleitende Beratung erfolgte durch die bbb : architekten in Kiel. Die wesentlichen Parameter sind:

- › dreigeschossiges Gebäude mit Klinkerfassaden und einer zusätzlichen Technikzentrale,
- › Nutzung als Unterkunftsgebäude mit 67 Unterkunftseinheiten,
- › Abmessungen L / B / H = 47,7 / 14,4 / 13,5 m, Brutto-Rauminhalt (BRI) 8100 m³.
- › Es wurden folgende Bauweisen bzw. Parameter variiert:
 - Massivbau mit Außenwänden und tragenden Innenwänden aus Kalksandstein,

- Stahlbetondecken und Stahlbetondach (Ausgangsvariante),
- Ausgangsvariante mit zwei bzw. vier Geschossen,
- Ausgangsvariante mit zusätzlichem Kellergeschoss,
- Ausgangsvariante mit Aluminiumfassaden oder verputzten Fassaden statt Vormauerwerk,
- Ausgangsvariante mit Tragkonstruktion in Holzbauweise.

C) Einfamilienhäuser eines Bauträgers

Es wurden ergänzend verschiedene freistehende Einfamilienhäuser eines Bauträgers für Massivhäuser in die Untersuchung einbezogen. Hierbei handelt es sich um Standardgrundrisse mit einem Brutto-Rauminhalt von zwischen 600 und 700 m³ der folgenden Haustypen:

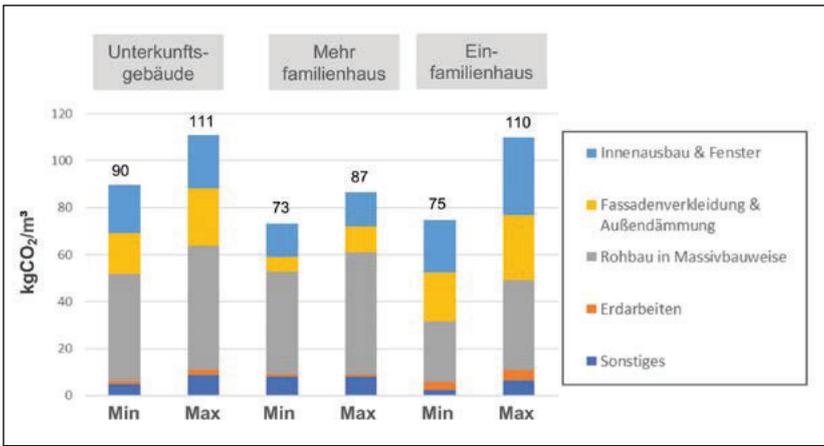
- › Einfamilienhaus mit tragenden Wänden aus Porenbeton, Stahlbetondecke und Satteldach,
- › Typ Stadtvilla, bestehend aus zwei Vollgeschossen mit tragenden Wänden aus Porenbeton, Stahlbetondecke und Walmdach,
- › eingeschossiger Bungalow mit tragenden Wänden aus Porenbeton, Holzbalkendecke und Walmdach.

Der Außenwandaufbau bestand jeweils aus zweischaligem Mauerwerk.

Für alle Gebäude wurde basierend auf DIN EN ISO 14040 bzw. DIN EN ISO 14044 das Treibhauspotenzial (GWP) als Sachbilanz einer Ökobilanz bestimmt, im Folgenden vereinfacht als „CO₂-Berechnung“ bezeichnet. Die Ergebnisse wurden dem Bewertungssystem der DIN EN 15978 gemäß ausgewertet. Die Berechnung bezog sich allerdings gezielt auf die „graue Energie“, also den CO₂-Anteil, der durch das Bauwerk – und nicht durch den Gebäudebetrieb – verursacht wird; innerhalb des Nutzungszeitraums sind daher lediglich die Phasen B4 (Austausch bzw. Ersatz) berücksichtigt worden, nicht die CO₂-Anteile, die aus der



Abb. 1, unten: Ansicht Grundvariante des betrachteten Unterkunftsgebäudes der GMSH



Görtz, Pham, Graage

Abb. 2: Fußabdruck kgCO₂/m³ Brutto-Rauminhalt für die Phase A (Erstellung des Bauwerks) der unterschiedlichen Massivbauvarianten

Nutzung selbst bzw. dem betrieblichen Energie- und Wassereinsatz resultieren. Alle anderen Phasen, die Erstellung (Phase A1-A5), die Entsorgung (Phase C1-C4) und auch das Recyclingpotenzial in Phase D, wurden vollständig einbezogen.

Die CO₂-Bilanzen der jeweiligen Gebäude erfolgten basierend auf konkreten Massen, die GWP-Einheitswerte wurden überwiegend der Ökobaudat entnommen, in Einzelfällen wurden spezielle Umweltproduktdeklarationen (EPD) von Herstellern herangezogen, deren Ermittlung auf Basis von DIN EN 15804 durchgeführt wurden. Lediglich der CO₂-Anteil der Technischen Anlagen (Sanitär-, Heizungs-, Lüftungs-, und Elektrotechnik etc.) wurde in Anlehnung an Weißenberger [5] mit 15 % abgeschätzt bzw. Erdarbeiten mit 5 %; die Werte wurden im Vorfeld plausibilisiert.

Die Lebensdauer der Bauwerke wurde zwischen 50 Jahren (gemäß Bewertungssystemen der DGNB bzw. BNB) und 120 Jahren variiert, bezüglich der Lebensdauer einzelner Bauteile (Fassadenverkleidung, Dämmplatt-

ten, Fenster oder auch Innenausbauten wie Innentüren, Bodenbeläge etc.) wurde sowohl auf die tabellarischen „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“ des BBSR zurückgegriffen als auch teilweise auf einen konkreten Erfahrungswertkatalog der GMSH.

Die Ergebnisse der durchgeführten CO₂-Berechnungen sind im folgenden Abschnitt zusammenfassend dargestellt.

CO₂-Emissionen für die Erstellung von Bauwerken in Massivbauweise (Phase A)

Obwohl die betrachteten Gebäude bzw. die variierten Parameter sehr verschieden sind, liegt das GWP (im Folgenden jeweils vereinfacht als „CO₂-Wert“ bezeichnet) der betrachteten in Massivbauweise erstellten Gebäude dennoch in einer ähnlichen Größenordnung. Für die reine Erstellung des Gebäudes, also der Phase A entsprechend DIN EN 15978, liegen die Werte zwischen ca. 73 und 111 kg CO₂/m³

Brutto-Rauminhalt (Abb. 2), also dem Volumen, das durch die Außenkontur des Gebäudes eingeschlossen wird. Große Schwankungen hinsichtlich des CO₂-Werts ergeben sich in der Fassadenverkleidung, je nachdem, ob z. B. eine sehr CO₂-intensive zweischalige Bauweise mit Vormauerziegeln (hier im Fall des Unterkunftsgebäudes und der Einfamilienhäuser) oder ein Wärmedämmverbundsystem (hier im Beispiel des Mehrfamiliengebäudes) mit Putzschicht verwendet wird.

Für eine Abschätzungen im Zuge von Voruntersuchungen lassen sich für einzelne Geschosse folgende Werte angeben:

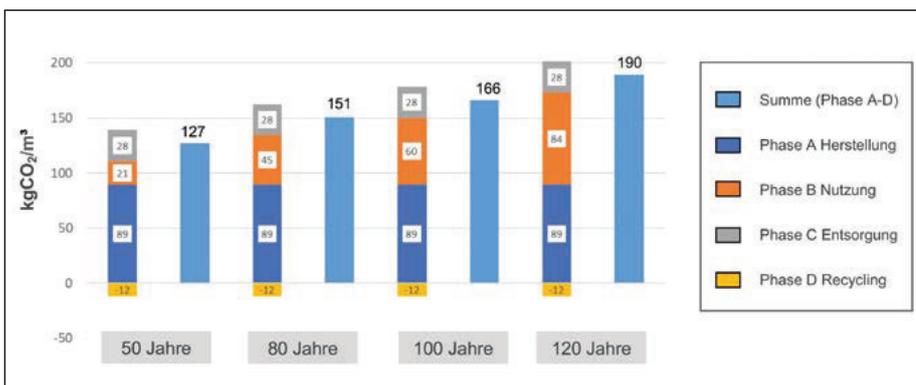
- Erdgeschoss inklusive Flachgründung: ca. 120 kgCO₂/m³
- Regelgeschoss: ca. 80 kgCO₂/m³
- Zuschlag für Keller: ca. 65 kgCO₂/m³

Das Erdgeschoss erfordert wegen der Gründung etwas höhere CO₂-Aufwendungen als ein Regelgeschoss. Im Fall eines ergänzenden Kellergeschosses lässt sich die zusätzliche CO₂-Emission mit ca. 65 kgCO₂/m³ abschätzen. Da die CO₂-intensive Fassadenverkleidung entfällt und der Innenausbau bzw. die Ausstattung im Kellergeschoss im Regelfall etwas minderwertiger ausfällt, sind die CO₂-Kennwerte hier trotz der ergänzenden Erdarbeiten etwas geringer als für ein Regelgeschoss. Die ermittelten CO₂-Kennwerte liegen in dem Bereich, den auch die DGNB in einer vergleichbaren Studie [6] an 50 Gebäuden ermittelt hat. Hier werden für die Phasen A1 bis A3 365 kg CO₂/m² Nettogrundfläche ermittelt; bei einer Geschosshöhe von ca. 3,0 m und einer Umrechnung zwischen Außenkontur und Nettogrundfläche von etwa 1,175 entspricht dies 365 / (3,0 · 1,175) = 104 kg CO₂/m³.

Die von Weidner/Sobek et. al. hergeleiteten Grenzwerte zur Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaabkommens von ca. 32 kgCO₂/m³ werden damit sehr deutlich – um den Faktor 2,3 bis 3,5 – überschritten.

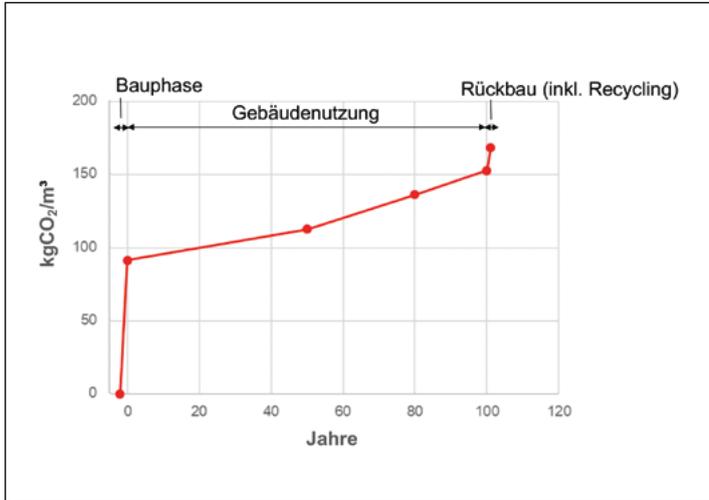
Betrachtung der CO₂-Emissionen über die gesamte Lebensdauer (Phase A bis D)

Wenn der Betrachtungszeitraum über die gesamte Lebensdauer ausgeweitet wird, steigt der CO₂-Ausstoß weiter an. Ab einem Zeitraum von ca. 15 bis 20 Jahren ist mit ersten Instandsetzungen bzw. Erneuerungen zu rechnen (Phase B) und nach 50 Jahren sind die meisten Bauteile und Bauteilkomponenten (Türen, Fenster, Fußbodenbeläge etc. ...) bzw. die Gebäudetechnischen Anlagen mindestens einmal vollständig ersetzt worden. Ebenso sind



Görtz, Pham, Graage

Abb. 3: mittlere CO₂-Emissionen/m³ Brutto-Rauminhalt bei Variation der Lebensdauer



Görtz, Pham, Graage

Abb. 4: Anwachsen der mittleren CO₂-Emissionen über die Zeitachse bei einer Lebensdauer von 100 Jahren

am Ende der Lebensdauer die CO₂-Emissionen für den Rückbau einzubeziehen (Phase C), wobei hier ein etwaiges Recyclingpotenzial einzelner Baustoffe gegengerechnet werden kann (Phase D). Da sich bei allen betrachteten Wohngebäudetypen die gleiche Tendenz abzeichnet, sind die CO₂-Werte in *Abbildung 3* als Mittelwerte angegeben.

Durch den erforderlichen Austausch steigen die Gesamt-CO₂-Emissionen über alle Phasen A bis D bei einer Lebensdauer von 50 Jahren auf ca. 127 kgCO₂/m³ bzw. bei einer Lebensdauer von 120 Jahren auf ca. 190 kgCO₂/m³ an. Die Werte wurden nochmals durch die vergleichbare Studie der DGNB [6] an 50 Gebäuden plausibilisiert; hier wurde in der Phase B bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren ein Zuwachs an CO₂ von 19% bezogen auf die Herstellungsphase A ermittelt, in der eigenen Berechnung sind es vergleichbare $21/90 \cdot 100 = 23\%$.

Ein zentraler Punkt ist allerdings, dass die CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase deutlich unterproportional ansteigen (*Abb. 4*), daher ist im Hinblick auf einen geringen CO₂-Ausstoß eine lange Lebensdauer die zu favorisierende Lösung; dies gilt gleichermaßen für die Tragkonstruktion wie auch für die einzelnen Ausbauten. Als Alternative bliebe bei einer kurzen Nutzungsdauer ja lediglich der Abbruch und Neubau, wodurch in Summe deutlich mehr CO₂ verursacht würde. Daher ist es für eine vergleichende Bewertung sinnvoll, die CO₂-Emissionen auf den Bezugszeitraum zu beziehen und „kgCO₂/m³ Brutto-Rauminhalt pro Jahr“ die zielführendere Einheit.

Abbildung 5 zeigt, dass sich die CO₂-Emissionen pro Jahr mit zunehmender Lebensdauer



Abb. 5: mittlere CO₂-Emissionen/(m³ Brutto-Rauminhalt · Jahr) bei Variation der Lebensdauer

Görtz, Pham, Graage

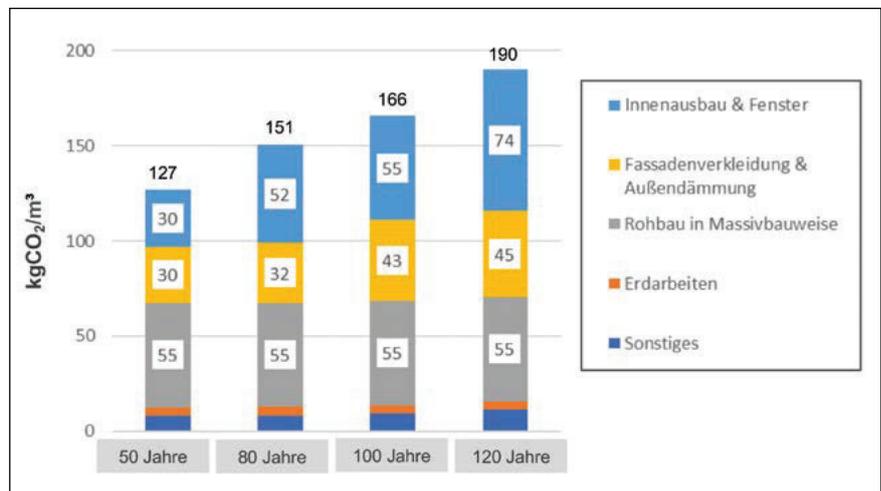


Abb. 6: Verteilung der CO₂-Emissionen auf einzelne Gewerke bei Variation der Lebensdauer

Görtz, Pham, Graage

Görtl, Pham, Graage

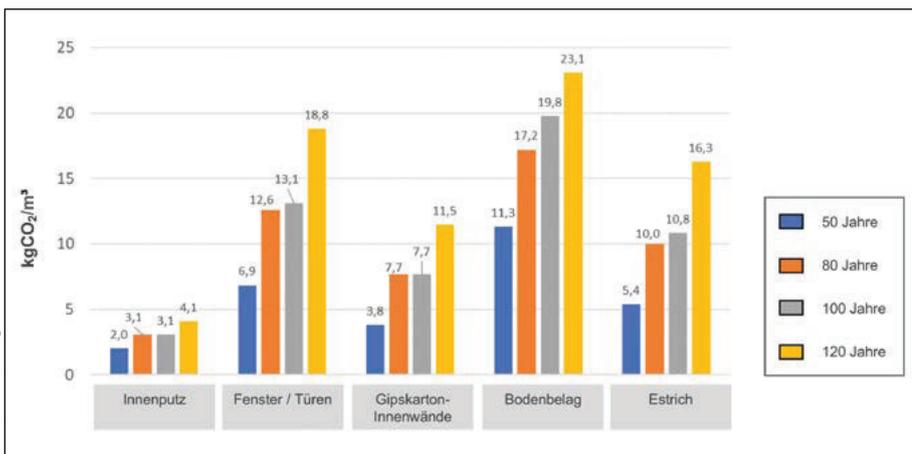


Abb. 7: Verteilung der CO₂-Emissionen auf einzelne Bauelemente bzw. Bauteilkomponenten für unterschiedliche Lebensdauern

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

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

Im Folgenden wurde eine Abschätzung vorgenommen, in welcher Größenordnung ein positiver Einfluss der angestrebten „Energiewende“ auf die Reduzierung der „grauen Energie“ erwartet werden kann. Hierzu wurden verschiedene Prognosen von dena 2018 [8], FutureCamp 2019 [9], Fraunhofer 2013 [10] und Agora 2020 [11] ausgewertet, um zu ermitteln, wie sich der CO₂-Ausstoß für eine Kilowattstunde Strom zukünftig reduziert. Diesem zufolge könnten sich die CO₂-Emissionen von aktuell ca. 420 g je kWh Strom mittelfristig auf Werte zwischen 25 und 50 g reduzieren, wenn der Strom verbrennungsunabhängig und aus erneuerbaren Energien gewonnen würde. Auch wenn diese Prognose

Verteilung der CO₂-Emission auf einzelne Bauteile

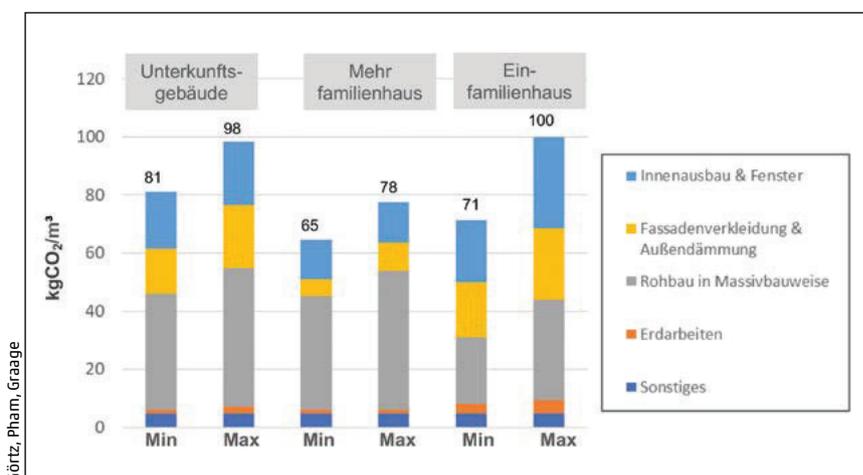
Die Ergebnisse der Untersuchungen im vorangegangenen Abschnitt über die Phase A zeigen, dass der CO₂-Fußabdruck für die Erstellung von Bauwerken aktuell deutlich zu hoch ist, um die Ziele des Pariser Klimaabkommens einzuhalten. Demzufolge sind zwingend Optimierungen vorzunehmen. Hierzu wird zunächst einmal untersucht, welche die Haupt-CO₂-Treiber sind. Daher wurden die ca. 100 Einzelpositionen der CO₂-Bilanz je Gebäude zu fünf wesentlichen Haupt-Gewerken (Erdarbeiten, Rohbau, Dämmung mit Fassadenverkleidung, Innenausbau mit Fenstern, sonstige Arbeiten) zusammengefasst. *Abbildung 6* zeigt, dass hierbei letztlich nahezu alle Positionen einen signifikanten Anteil an CO₂-Emissionen aufweisen und sich nicht „der eine“ zentrale Haupt-CO₂-Treiber herauskristallisiert.

Weiterhin zeigt sich, dass mit wachsender Lebensdauer vor allem der Anteil der Ausbauten zunimmt, weil diese Bauteile kürzere Lebensdauern aufweisen und entsprechend häufiger ausgetauscht werden müssen. Bereits bei einer Lebensdauer von 80 Jahren ist dies der dominierende Anteil in der CO₂-Bilanz, der bei einer Nutzungsdauer von 120 Jahren auf fast 40% anwächst.

Bei weiterer Untergliederung der Innenausbauwerke bestätigt sich nochmals, dass kein eindeutiger „Haupt-CO₂-Treiber“ existiert, sondern dass eine Vielzahl von Bauteilen einen signifikanten Einfluss auf den CO₂-Ausstoß hat und daher an vielen verschiedenen Stellen optimiert werden muss (*Abb. 7*).

Untersuchung des Einflusses der Energiewende auf die „graue Energie“

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



Görtl, Pham, Graage

Abb. 8: CO₂ Emission/m³ Brutto-Rauminhalt für die Phase A (Erstellung des Bauwerks) unter Berücksichtigung der „Energiewende“ mit einem CO₂-Ausstoß von lediglich 25 g/kWh Strom

im Rückblick auf die bislang erzielten Erfolge eher optimistisch scheint, wird im Folgenden dennoch eine Untersuchung durchgeführt, um wieviel sich die „graue Emission“ reduzieren würde, wenn für die Erzeugung einer kWh Strom lediglich 25 g CO₂ emittiert würden.

Die Ergebnisse in *Abbildung 8* zeigen im Vergleich zur Ausgangssituation in *Abbildung 2*, dass der Energieumbau die „graue Emission“ der Gebäudeerstellung lediglich untergeordnet beeinflussen würde; die CO₂-Emissionen reduzieren sich hierbei im Mittel um ca. 10%. Dies liegt in dem geringen Anteil des elektrisch bedingten CO₂ an den Gesamt-CO₂-Emissionen bei der Herstellung der Baustoffe begründet. Dieses am Beispiel der Zementherstellung erläutert: Für eine Tonne Zement sind im Durchschnitt 587 kg CO₂ erforderlich. Davon sind ca. 287 kg auf chemische Prozesse zurückzuführen, die bei der Umwandlung von Kalkstein zu Zementklinker unvermeidbar anfallen. Weitere 206 kg fallen durch erforderliche Verbrennungsprozesse an und lediglich 71 kg sind abhängig von elektrischer Energie. Daher reduzieren sich die CO₂-Emissionen – unter Beibehaltung der bisherigen Verfahrenstechnologie – selbst bei fast 100% regenerativer Energieerzeugung lediglich um ca. 10% pro ca. 520 kgCO₂/m³. Dies lässt sich auch auf andere mineralische Baustoffe übertragen; der CO₂-Ausstoß von 1 m³ Kalksandstein würde sich beispielsweise von ca. 227 kg auf ca. 203 kg reduzieren. Da der Anteil der „grauen Emission“ nach den Untersuchungen aus dem Abschnitt zur Phase A aktuell allerdings um den Faktor 2,3 – 3,5 zu hoch ist, reicht diese 10%-ige Reduzierung zur Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens nicht aus, zumal der angesetzte CO₂-Ausstoß von 25 g/kWh aktuell ohnehin illusorisch scheint. Um die CO₂-Emissionen auf das zulässige Maß von ca. 32 kg/m³ Brutto-Rauminhalt zu reduzieren, müssen daher zwingend andere bautechnische Lösungen ausgearbeitet werden.

Alternative Untersuchung in Holzbauweise

Als eine Optimierungsmöglichkeit werden im Folgenden die Auswirkungen untersucht, wenn die Massivbauweise möglichst weitreichend durch Holzbauweise ersetzt wird. Da Holz im Zug der Entstehungs- bzw. Wachstumsphase CO₂ speichert, ist in der Ökobaudat in der Phase A1 (Rohstoffbereitstellung) sogar ein negativer GWP-Wert von -767,5 kgCO₂/m³ Holz angegeben. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass das gespeicherte CO₂ am Ende

der Lebensdauer wieder entweicht, sei es durch eine thermische Verwertung oder durch eine allmähliche Verrottung. Weiterhin ist zu beachten, dass der Ansatz des negativen GWP-Werts nur gerechtfertigt ist, wenn im Zug einer nachhaltigen Forstwirtschaft für jeden gefälltten Baum wieder ein neuer gepflanzt wird und wenn die Lebensdauer des Holzes (bzw. der Zeitraum, bis zu dem das gebundene CO₂ wieder entweicht) in der Größenordnung der Hiebrieife eines Baums – also etwa bei 80 Jahren – liegt. Dieses ist bei einer direkt bewitterten Fassade im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit/Lebensdauer sicherlich zu diskutieren, bei Einsatz von Holz im Bereich der eigentlichen – vor Witterung geschützten – Tragkonstruktion kann dies jedoch als sichergestellt angesehen werden.

So wurden sowohl das Unterkunftsgebäude als auch das Mehrfamilienhaus mit dem Detaillierungsgrad einer Vorbemessung in Holzbauweise umgeplant. Im Zug der Vorabschätzung wurde allerdings nur die Tragkonstruktion durch eine Holzkonstruktion ersetzt.

Neben statischen Aspekten sind die Anforderungen an den Brandschutz zu beachten und eine aufwändigere Entkopplung der Bauteile gegen die Übertragung von Schall. Im Einzelnen wurden gegenüber dem Untersuchungsumfang bei Wohngebäuden erläuterten Konstruktionsweisen folgende Veränderungen vorgenommen (*siehe Abb. 9*):

- Decken aus Brettschichtholzbindern mit Aufbau aus Brettsperrholzplatten statt Stahlbeton,
- Außenwände in Holztafelbauweise statt Mauerwerk,
- tragende Innenwände aus Brettsperrholzplatten statt Mauerwerk.

Die CO₂-Einheitswerte wurden der Ökobaudat entnommen, wobei nach der Rückbauphase am Ende der Lebensdauer von einer stofflichen Verwertung ausgegangen wurde, weil eine energetische Verwertung (quasi eine Gewinnung von Energie aus einer Verbrennung von Holz) am Ende der theoretischen Lebensdauer (also zwischen 2100 und 2140) nicht mehr als realistisch angesehen wird. Hier-

LORO-X



LORO-X

Kaskadenentwässerung

mit drückender Freispiegelströmung

- mit Sammelleitung zwischen Dachabdichtung und Plattenbelag oder in der Wärmedämmung
- mit Mehrgeschossabläufen direkt in der Attika



Wir sind auf der

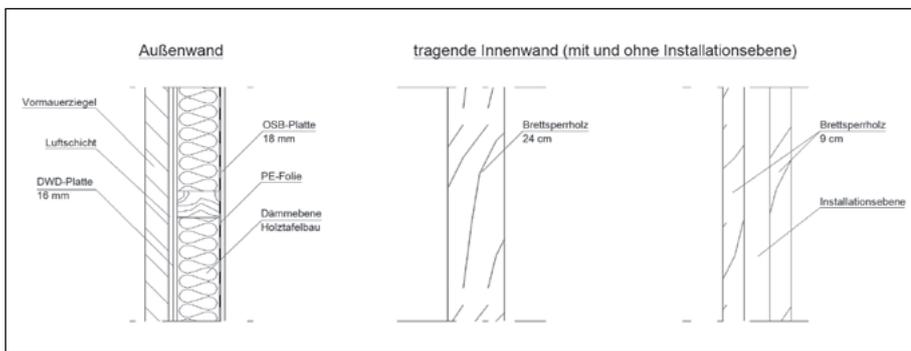
BAU München

17.04. – 22.04.2023

Halle B2 / 310

www.loro.de





Göritz, Pham, Graage

Abb. 9: Wandtypen bei Realisierung in Holzbauweise

durch wird der Baustoff Holz über alle Phasen A bis D mit einem CO₂-Wert von ca. 80 kgCO₂/m³ für Konstruktionsvollholz und 115 kgCO₂/m³ für Brettsperrenholz in der CO₂-Bilanz berücksichtigt.

34

Die hiermit durchgeführten CO₂-Berechnungen ergeben, dass sich bei einer Umlanung der Tragkonstruktion in Holzbauweise (bei gleichen Gebäudeanforderungen) CO₂-Einsparungen von ca. 40 kg/m³ Brutto-Rauminhalt erzielen lassen; das sind je nach Lebensdauer etwa 0,4 bis 0,8 kgCO₂/(m³ BRI a). Da allerdings für Gebäudegründung, Innenausbau sowie Außendämmung und Fassadenverkleidung weiterhin hohe CO₂-Werte verbleiben, reicht dies allein nicht aus, um den von Weidner/Sobek et. al. ermittelten Grenzwert von 32 kg CO₂/m³ zu erreichen – es sind daher weitere Optimierungen erforderlich.

Sonstige Variationen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen

Gerade auch die Ergebnisse der Untersuchungen aus dem vorangegangenen Abschnitt über die Verteilung der CO₂-Emission auf einzelne Bauteile zeigen, dass es nicht „den einen“ Haupt-CO₂-Treiber gibt, sondern dass bei allen Bauteilen und Bauelementen versucht werden muss, CO₂-arm zu konstruieren. Hierzu im Folgenden einige Vorschläge:

- ▶ Da Stahlbeton – unter Berücksichtigung der Bewehrung – einen sehr hohen CO₂-Ausstoß von ca. 320 kg/m³ aufweist, ist es sinnvoll, die erforderlichen Betonmengen auf das grundlegende Maß zu reduzieren. Teilweise kann dies sinnvoll durch Holzkonstruktionen erfolgen (siehe Abschnitt über die alternative Untersuchung in Holzbauweise); in vielen Bereichen wird der Einsatz von Stahlbeton – vor allem auch als langlebiger Baustoff – auch im Hochbau weiterhin erforderlich bzw. sinnvoll sein, sei es im Zug der Gründung oder auch im Bereich von

aussteifenden Bauteilen bei höheren Gebäuden. Hier gilt es dann einerseits, die Abmessungen zu optimieren, andererseits bei den verbleibenden Betonmengen vor allem die Menge an Portlandzementklinker zu reduzieren.

- ▶ Der CO₂-Anteil von Zement kann beispielsweise durch Verwendung von Hüttensand, der als Nebenprodukt der Stahlherstellung anfällt, deutlich reduziert werden. Bei Verwendung des maximal zulässigen Anteils von 80 % Hüttensand eines Zements CEM III B reduziert sich der CO₂-Anteil für den Zement, der ausschließlich aus Portlandzementklinker besteht, von ca. 850 kgCO₂/to auf ca. 250 kgCO₂/to. Da der Zement der maßgebende CO₂-Treiber beim Beton ist, geht dies mit einer Reduzierung des CO₂-Anteils des Betons einher. So sind für einen Beton C30/37, dessen Zement ausschließlich aus Portlandzementklinker besteht, ca. 304 kgCO₂/m³ erforderlich, bei einer Verwendung von CEM III B mit einem Hüttensandanteil von 80 % lediglich 110 kgCO₂/m³. Bei den betrachteten Gebäuden würde die Verwendung eines CEM-III-B-Zements in den Phasen A1 bis A3 zu einer Reduzierung der Gesamt-CO₂-Menge von 12 % führen. Zu beachten sind bei Verwendung von Hochofenzement allerdings die etwas längere Erhärtungsdauer; daher ist der Hüttensandanteil an einen sinnvollen Bauablauf anzupassen.
- ▶ In Einzelfällen lassen sich z. B. auch durch Ersatz der konventionellen Betonstahlbewehrung durch eine Basaltfaserstabbewehrung bis zu 30 % CO₂ einsparen [12]. Sinnvolle Anwendungen sind Bauteile im Tausalzbereich mit geringer bis mittlerer statischer Beanspruchung, wie z. B. bei Bodenplatten von Tiefgaragen und Parkhäusern außerhalb des Durchstanzbereichs oder bei Brückenkappen [13]. Einerseits sind die CO₂-Emissionen der Bewehrung – unter Berücksichtigung des

geringeren Gewichts und der höheren Festigkeit – ca. 45 % geringer als bei konventioneller Betonstahlbewehrung, andererseits kann darüber hinaus die Mindestbetonfestigkeitsklasse von C35/45 aus dem Tausalzangriff auf C25/30 reduziert werden. Dies führt mit den Einheitswerten der Ökobaudat für die Herstellungsphasen A1 bis A3 des Betons zu einer CO₂-Reduzierung von 245 auf 197 kgCO₂/m³ Beton, also einer Reduzierung um 20 %. Unter der Annahme, dass der Beton zu etwa 2/3 und die Bewehrung zu etwa 1/3 in die Gesamt-CO₂-Bilanz eines bewehrten Betonbauteils eingehen, würde dies zu einer CO₂-Einsparung von $\frac{2}{3} \cdot 20 + \frac{1}{3} \cdot 45 = 28\%$ führen. Das sind ca. 100 kgCO₂/m³ bewehrter Beton.

- ▶ Einen hohen Anteil an CO₂-Emissionen hat beispielsweise auch der Estrich, der statisch zwar untergeordnet ist, aber – im Fall des üblicherweise verwendeten Zementestrichs – mit 240 kgCO₂/m³ einen ähnlich hohen CO₂-Ausstoß aufweist wie Beton. Hier gilt es, Estrichstärken zu hinterfragen bzw. zu optimieren (ohne die Funktion zu beeinträchtigen) oder ggf. Sonderlösungen zu erwägen. So lässt sich der CO₂-Ausstoß einer 6 cm starken Estrichschicht bei Verwendung eines Trockenestrichs aus Gipsplatten in den Phasen A1 bis A3 von $0,06 \cdot 240 = 14,4$ kgCO₂/m² um 70 % auf ca. 4,2 kg/m² reduzieren.

Weitere Empfehlungen zum nachhaltigen Bauen bzw. zur CO₂-Reduzierung sind beispielsweise in [3, 14] enthalten.

Die vorgenannten Punkte sowie weitere Variationen sollen im Folgenden von der Hochschule Kiel zusammen mit einem breit aufgestellten Praxisteam bestehend aus der Gebäudemanagement Schleswig-Holstein AÖR als Bauherrenvertreterin, den bbp : architekten und dem Ingenieurteam Trebes innerhalb eines Forschungsvorhabens untersucht werden [15]. Hierbei sollen auch die Wechselwirkungen zwischen „grauer Energie“ und CO₂-Anteilen aus dem Betrieb des Gebäudes einbezogen werden.

Zusammenfassung

Nach aktuellem Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass mehr als 50 % der weltweiten CO₂-Emissionen auf den Bausektor zurückzuführen sind [1]. Hiervon entfallen ca. zwei Drittel auf Hochbauwerke. Dem Bauwesen, speziell dem Hochbau, kommt daher eine zentrale Bedeutung bei der Abwendung der Klimakatastrophe zu.

Gemäß dem Sachverständigenrat für Umweltfragen steht Deutschland zur Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaabkommens ein CO₂-Restbudget von vier Gigatonnen zur Verfügung. Basierend auf einer Abschätzung des anstehenden Bauvolumens ist von Weidner/Sobek et. al. in [3] errechnet worden, dass für Bauwerke je Kubikmeter Brutto-Rauminhalt lediglich ca. 32 kgCO₂ emittieren dürften. Um diesen Wert einzuordnen, wurden an der Hochschule Kiel für typische Standardwohngebäude CO₂-Bilanzen durchgeführt, um einen Eindruck zu gewinnen, wieviel CO₂/m³ Brutto-Rauminhalt aktuell bei konventionellen Bauweisen verbraucht wird und was die Haupt-CO₂-Treiber sind [4].

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Nach den durchgeführten Untersuchungen werden aktuell für Standardwohngebäude, die in konventioneller Massivbauweise erstellt werden, in den Phasen A1 bis A5 zwischen ca. 75 und 115 kgCO₂/m³ Brutto-Rauminhalt verbraucht. Dies liegt in der Größenordnung, die auch die DGNB in einer vergleichbaren Studie ermittelt hat. Die von Weidner/Sobek et. al. [3] ermittelten Grenzwerte zur Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaabkommens werden damit sehr deutlich um den Faktor 2,3 bis 3,5 überschritten.
- Die o. g. Werte lassen sich auch nicht signifikant reduzieren, wenn zukünftig ein höherer Anteil an Strom aus regenerativer Energie erzeugt wird. Da der wesentliche CO₂-Anteil aus der Erstellung der Baustoffe resultiert, hier allerdings die chemischen und thermischen CO₂-Anteile überwiegen, sind selbst bei überwiegend regenerativer Energieerzeugung lediglich CO₂-Einsparungen im Bereich von ca. 10 % zu erwarten. Um die CO₂-Emissionen ausreichend zu senken,

bedarf es daher zwingend einer Veränderung der konventionellen Bauweise.

- Durch Ersatz der massiven Tragkonstruktion durch eine Holzkonstruktion lässt sich die graue Emission des Gebäudes um ca. 20 % bis 30 % reduzieren. Da allerdings für Gebäudegründung, Innenausbau sowie Außendämmung und Fassadenverkleidung weiterhin hohe CO₂-Werte verbleiben, reicht dies allein nicht aus, um den von Weidner/Sobek ermittelten Grenzwert von 32 kg/m³ zu erreichen – es sind daher weitere Optimierungen in allen Gewerken erforderlich. Die Analyse zeigt, dass nicht „der eine“ signifikante CO₂-Treiber existiert, sondern dass in allen Bereichen versucht werden muss, CO₂ einzusparen.
- Grundsätzlich muss es eine Zielsetzung sein, durch dauerhafte Konstruktionen und flexible Gebäudekonzepte eine möglichst lange Lebensdauer zu erzielen. Anhand der durchgeführten Berechnungen lassen sich die CO₂-Emissionen bei einer Erhöhung der Lebensdauer von 50 auf 120 Jahre um fast 40 % senken.

Basierend auf diesen ersten Untersuchungen sollen zukünftig innerhalb eines von der EKSH geförderten Forschungsvorhabens [15] konkrete Optimierungen und Empfehlungen für die praktische Anwendung ausgearbeitet werden. ◀

LITERATUR

- [1] Sobek, W.: non nobis – über das Bauen der Zukunft. Band I: Ausgehen muss man von dem, was ist. 3. Auflage 2022. ISBN 978-3-89986-369-7
- [2] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa. Umweltgutachten 2020, SRU, 2020
- [3] Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R.; Sobek, W.: Graue Emission im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. Beton- und Stahlbetonbau Dezember 2021, S. 969 – 977
- [4] Görtz, S., Pham, T. K. D., Graage, F.-L.: CO₂-Bilanzierung und Optimierung von Hochbauwerken – Voruntersuchung. Kleinförderung durch die Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH, November 2020 - Februar 2022.
- [5] Weißberger, M.: Lebenszyklusbasierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik. München, 2016
- [6] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB): Benchmarks für die Treibhausgasemission der Gebäudekonstruktion. Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden, August 2021.
- [7] Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen GmbH: Kurzbeschreibung Typengebäude MFH.
- [8] dena: dena-Leitstudie "Integrierte Energiewende". Berlin, Juli 2018.
- [9] FutureCamp, Dechema: Roadmap Chemie 2050. München, September 2019.
- [10] Fraunhofer: Energiesystem Deutschland 2050. Freiburg, November 2013.
- [11] Agora: Klimaneutrales Deutschland – Studie: In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Berlin, 2020.
- [12] Görtz, S.; Lengert, K.; Glomb, D.; Wolf, B.; Kustermann, A.; Dauberschmidt, C.: Reinforcement made of basalt fibre reinforced polymer (BFRP) – load-bearing capacity, durability and applications. The 8th international Conference on structural engineering, mechanics and computation, Cape Town, September 2022
- [13] Kustermann, A.; Dauberschmidt, C.; Glomb, D.; Wolf, B.; Görtz, S.; Lengert, K.; Burgard, S.; Schwarzer, M. 2021: Entwicklung ressourcenschonender, dauerhafter und frostbeständiger Brückenkapfen auf Grundlage nichtmetallischer Bewehrung und Betonen mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung. ZIM-Projekt KK5102701K10
- [14] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Nachhaltig bauen mit Beton – Planungshilfe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb)
- [15] Fachhochschule Kiel, Gebäudemanagement Schleswig-Holstein AöR, bbp : architekten, Ingenieurteam Trebes: Reduzierung des CO₂-Bedarfs von Hochbauwerken in Schleswig-Holstein. Forschungsprojekt an der Fachhochschule Kiel, gefördert durch die Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH, ab Juni 2023.



STEPHAN GÖRTZ

➤ nach Promotion am Institut für Massivbau der RWTH Aachen und 16-jähriger Tätigkeit als Projektleiter/Leitender Angestellter im Ingenieurunternehmen seit September 2018 Professor für Konstruktiven Ingenieurbau an der FH Kiel



THI KIM DUNG PHAM

➤ zwischen 2017 und 2021 Tragwerksplanerin bei der Bonava Deutschland GmbH, seither wissenschaftliche Mitarbeiterin an der FH Kiel



FINN-LASSE GRAAGE

➤ Abschluss des Studiums Bauingenieurwesen im Jahr 2022 an der FH Kiel und seitdem Angestellter in einem Ingenieurbüro für Tragwerksplanung; durch Projekte im Studium entstand das Interesse an der CO₂-Bilanzierung.