

06 Case Study und Diskussionsvorschlag einer praktikablen Gebäudebewertung

Svenja Binz, Juliane Jäger

Anlass und Zielsetzung

Um den klimapolitischen Top-down-Ansatz der Budgetierung gemäß KSG mit dem Bottom-up-Ansatz der Ökobilanzierung des Lebenszyklus eines konkreten Gebäudes vergleichen zu können, wird eine Case-Study-Betrachtung vorgenommen. Damit kann (wenngleich nur exemplarisch) anhand eines konkreten Gebäudes die Zuordnung von THG-Emissionen zu Sektoren (Quellprinzip) und ihre Zuordnung zu ursächlich verantwortlichen Bereichen (Verursacherprinzip) sichtbar gemacht und quantifiziert werden. Der Ansatz, THG-Emissionsabschätzungen aus Bottom-up-Berechnungen mit den Zielpfaden aus Top-down-Strategien im Sinne eines verbesserten, nationalen THG-Emissionsmonitorings abzugleichen, wird damit skizziert.

Die Case-Study-Betrachtung verdeutlicht, welche Auswirkungen die Wahl einer Definition zur (Netto-)THG-Neutralität auf das Ergebnis abgeschätzter Emissionsmengen eines Gebäudes hat beziehungsweise in welcher Größenordnung potenzieller Umwelt- und Klimawirkungen durch unterschiedliche Definitionen abgebildet werden. Es wird der Versuch einer kompletten Lebenszyklusbetrachtung sowie eine erweiterte Indikatorenbetrachtung vorgenommen, um die Grenzen und Möglichkeiten des aktuellen Werkzeugkastens der Ökobilanz aufzuzeigen. Die Case-Study-Betrachtung ermöglicht es weiterhin, anhand von Szenarien und Varianten sowohl bauliche als auch nutzungs- und organisationsbezogene, das heißt Suffizienzmaßnahmen hinsichtlich ihres THG-Emissionsminderungspotenzials zu vergleichen.

Der Umgang mit dem Bestand und dessen notwendige energetische Sanierung stehen im Fokus der aktuellen Debatte zum Klimaschutz und zur Begrenzung von Ressourcen- und Flächenverbrauch im Handlungsfeld Gebäude.

Der Anteil des Neubaus am Gebäudebestand macht seit 2012 jährlich lediglich 3 % aus (DUH 2022: 12); der größere Hebel auf dem Weg zum treibhausgasneutralen Gebäudebestand bis 2045 kann somit in der Betrachtung der Sanierung liegen. Entsprechend wird ein Bestandsgebäude mittels Ökobilanzierung in unterschiedlichen Szenarien betrachtet und ausgewertet. Die Forschungsarbeit ist hinsichtlich zweier Aspekte limitiert: Erstens sind nicht für alle Module des Lebenszyklus Daten vorhanden, sodass hier Annahmen getroffen werden müssen. Zweitens ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse limitiert, da es sich lediglich um die Auswertung einer einzelnen Case Study handelt. Eine nationale Hochrechnung erfolgt nicht. Das einheitliche Problemverständnis, die konzeptionelle Betrachtung beziehungsweise das generelle Herausarbeiten von Forschungsbedarfen stehen im Vordergrund.

Anhand der bilanzierten Case Study wird entsprechend exemplarisch

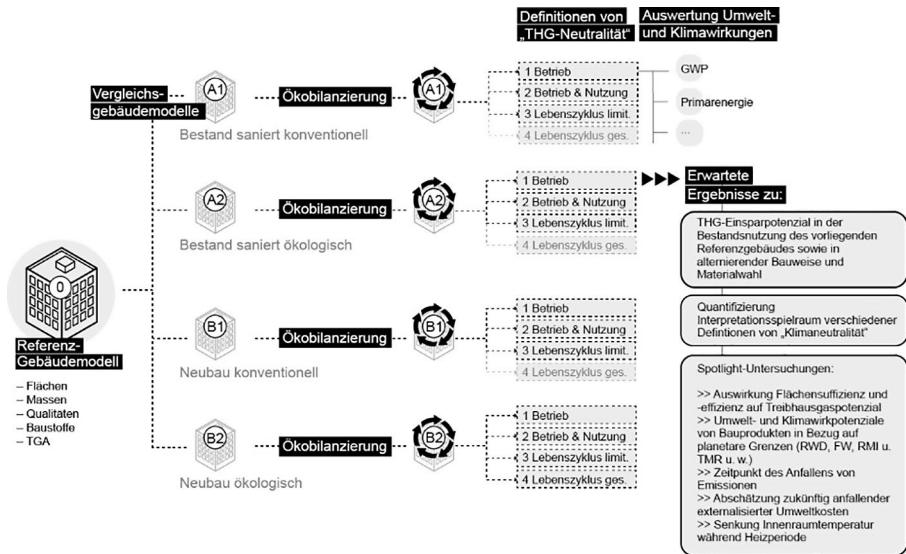
- mittels Ökobilanzierung und Szenarienvergleich ermittelt, ob ein THG-Einsparpotenzial durch Sanierung des Referenzgebäudes versus (Ersatz-)Neubau im Lebenszyklus erzielt wird und wie sich alternierende Bauweisen auswirken:
 Szenario A1: Bestand saniert – konventionell 2022,
 Szenario A2: Bestand saniert – ökologisch 2022,
 Szenario B1: Neubau – konventionell 2022,
 Szenario B2: Neubau – ökologisch 2022;
- mittels Ökobilanzierung und Variantenvergleich die Größenordnung beziffert, die sich durch Anwendung unterschiedlicher Definitionen beziehungsweise Berechnungsregeln (vorrangig durch in unterschiedlichem Umfang in Bezug genommener Module der Lebenszyklusbetrachtung) ergibt. Ausgewählte theoretische Ansätze, die bereits als unterschiedliche definitorische Ansätze der THG-Neutralität dargestellt wurden, werden beispielhaft mit Zahlen hinterlegt und somit das sogenannte definitorische Delta anhand eines Beispielgebäudes quantifiziert:
 DEF 1: Auswahl Module gemäß (netto-)treibhausgasneutral im Betrieb,
 DEF 2: Auswahl Module gemäß (netto-)treibhausgasneutral in Betrieb und Nutzung,
 DEF 3: Auswahl Module gemäß (netto-)treibhausgasneutral im limitierten Lebenszyklus,
 DEF 4: Auswahl Module gemäß (netto-)treibhausgasneutral im Lebenszyklus;

- mittels Ökobilanzierung und Detailuntersuchungen der Einfluss von Einzelaspekten (= sogenannte Spotlights), zum Beispiel das sogenannte Verschieben des ökologischen Rucksacks zulasten anderer planetarer Grenzen oder Suffizienzmaßnahmen zur Erreichung der THG-Neutralität im Handlungsfeld Gebäude, konzeptionell betrachtet:
 Spotlight 1: Kopplung von Umwelt- und Klimawirkpotenzialen an das planetare Grenzkonzept,
 Spotlight 2: Abbilden von veränderten Raum- und Nutzungskonzepten durch neue Bezugsgrößen,
 Spotlight 3: Reduktion der Innenraumtemperatur in Büroetagen um 1 °C während der Heizperiode,
 Spotlight 4: Zeitpunkt des Anfallens von Emissionen im Lebenszyklus von Gebäuden,
 Spotlight 5: Abschätzung zukünftig anfallender externalisierter Umweltkosten.
- Abschließend werden die untersuchten Maßnahmen kombiniert ausgewertet (vgl. nachfolgende Abbildung 26).

Methodik und Systemgrenzen

Das Gebäudemodell wurde anhand von Bestandsplänen als digitales 3-D-CAD-Modell einschließlich einer Mengen- und Massenermittlung erstellt. Als Datengrundlage für die Ökobilanzierung wurde die ÖKOBAUDAT2020-II (A1) verwendet. Die Analyse wurde parallel mit den Software-Lösungen Hottgenroth und eLCA durchgeführt, um einerseits energetische Kennwerte zu generieren und andererseits in Bezug auf die ökobilanzielle Auswertung die Ergebnisse überprüfen zu können. Innerhalb der Software nicht erfasste Module des Lebenszyklus wurden auf Basis begründeter Annahmen manuell ergänzt und in Excel-Datenblättern ausgewertet. Alle Berechnungen der Case Study basieren auf einem Stand der normativen und förderrechtlichen Rahmenbedingungen von 2023.

Abbildung 26: Methodisches Vorgehen und Arbeitsschritte der Case-Study (BBSR, eigene Darstellung)



Systemgrenze Gebäudemodell: Als Case Study wurde ein reales Gebäude ausgewählt (Typologie: Bürogebäude) mit Standort Berlin. KG 300 (Bauwerk) und KG 400 (Haustechnik) wurden vollständig abgebildet. KG 500 (Außenanlagen) wurde vernachlässigt, da dem Gebäude im Innenstadtbereich kaum Außenraum direkt zugeordnet ist und Außenflächen hier nicht der Versorgung des Gebäudes dienen.

Systemgrenze Lebenszyklusmodell: Als Betrachtungszeitraum wurden 50 Jahre angesetzt. Bezugsgröße und Indikatoren werden in vergleichenden Varianten betrachtet. Die gebäude- und betriebsbedingten Anteile bezüglich der Klima- und Umweltwirkpotenziale wurden für alle vier Gebäudemodelle/Szenarien in zwei Varianten (Umfang nach GEG und nach QNG) erfasst. Für das Gebäudemodell »Neubau – ökologisch 2022« wurden vier Varianten bezüglich K Umwelt- und Klimawirkpotenziale im Lebenszyklus verglichen. Module außerhalb des DIN-konformen Lebenszyklus wurden nicht mit den übrigen Modulen verrechnet, sondern als Zusatzinformation ausgewiesen.

Untersuchungsgegenstand

Als Untersuchungsgegenstand wurde ein Bürohochhaus der Moderne gewählt. Es wurde in den späten 1950er-Jahren errichtet und in den 1980er-Jahren energetisch saniert. Eine weitere Sanierung ist geplant. Das Beispielgebäude liegt zentral innerstädtisch und ist Teil eines denkmalgeschützten Gebäude-Ensembles.

Auf einer Grundfläche von 15,10 m x 78,00 m und einer Höhe von 57 m werden 16.965 m² Netto-Raumfläche (NRF) untergebracht. Über einem Tiefgaragengeschoss befindet sich die Sockelzone mit Erdgeschoss und einem eingehängten Obergeschoss. Hier befanden sich Gewerbe und Gastronomieeinheiten. Darüber befinden sich 14 Büroetagen. Der damit 16-geschossige Bürobau mit seiner reduzierten Formensprache und starker Rasterung der Fassade steht exemplarisch für (Büro-)Bauten der Moderne. Durch die Skelettbauweise mit aussteifenden Kernen sind flexible Grundrisse möglich, welche eine (Um-)Nutzung des Bestands befördern.

Konstruktiv handelt es sich um einen Stahlbetonskelettbau, teils unter Verwendung vorgespannter Stahlbetonelemente für Stahlbetonstützen und -balken im Raster von 7,40 m sowie Stahlbetonrippendecken. Die Stützen der Sockelzone wurden Pilotis in Sichtbetonqualität ausgeführt. Die Querschnitte der Tragkonstruktion in den Büroetagen verjüngen sich nach oben. Die originäre Außenverkleidung wurde in Sichtbeton ausgeführt. An den Fassadenlängsseiten und der nördlichen Giebelwand ergaben sich durch ca. 55 cm tiefe Auskragungen und den Wechsel von Sichtbetonbrüstungen beziehungsweise Glas- und weißen Gussglasflächen ein abstraktes horizontales Gesamtmuster und ein vitales, unregelmäßiges Fassadenrelief (sogenanntes »verwischtes Raster«). Die Giebelseite im Süden ist fensterlos, da sie sich dem Verkehr zuwendet. An der Ostfassade wurde ein über die Trauflinie hinausgehender Treppenturm mit einer Außenhaut aus Sichtbeton ausgeführt. Die Schaufenster des Erdgeschosses sowie des 1. Obergeschosses wurden mit einer eisernen Unterkonstruktion und außen mit eloxierten Leichtmetallpaneelen verkleidet sowie mit Spiegeldrahtglas verglast. Alle anderen Etagenfenster wurden als Verbundfenster aus Stahl und Kristallspiegelglas gebaut. Die meisten Fenster wurden als Drehfenster ausgeführt, damit sie besser zu reinigen waren. Die originale Sichtbetonfassade wurde 1985 im Rahmen einer energetischen Sanierung durch eine Aluminiumfassade ersetzt, auch alle Fenster wurden damals ausgetauscht. Den Nutzenden war die Gestaltung der Grundrisse frei überlassen, wenngleich die Freiheit durch die weit auseinanderliegenden

Treppenhäuser für Brandschutz und Rettungswege beschränkt wurde. (Dorsemagen 2004: 291ff; Lemburg 2015: 36)

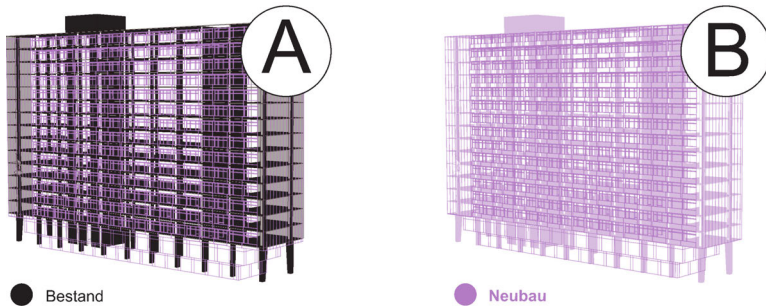
Zukünftig soll das Beispielgebäude überwiegend als Bürogebäude genutzt bleiben. Wenngleich der Bau in den 1980er-Jahren saniert wurde, erfüllt er heutige energetische Standards nicht. Das offene Raster der Tragstruktur lässt nicht nur Spielraum für energetische Modernisierung und Fassadengestaltung, sondern insbesondere auch für neue innovative Büroraumkonzepte. Da die Bausubstanz der Moderne und folgender Epochen vielfältige Fragestellungen des angemessenen Umgangs mit dem Baubestand stellt, wurde dieses Beispielgebäude gewählt.

Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Vergleich nach Maßnahmenart und Bauweise

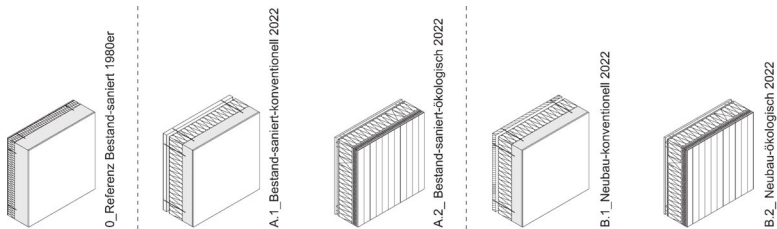
Szenario A entspricht einer Komplettmodernisierung. Die Tragstruktur (Stützen, tragende Wände, Treppenhäuser, Decken, Dach, Keller) wurde erhalten und energetisch nach Standard KfW NH55 saniert. Die Außenfassade, nicht tragende Wände und innen liegende Oberflächen wurden größtenteils ersetzt. In Szenario A.1 (konventionell, Bestand) wurde die Fassade mit vorgefertigten Stahlbetonfertigbauteilen verkleidet. Nicht tragende Wände wurden als Gipskartonwände angenommen und Fenster aus pulverbeschichtetem Aluminium ausgeführt. In Szenario A 2 (ökologisch, Bestand) wurden, wenn möglich, nachwachsende Rohstoffe verwendet. Die Fassade wurde mit vorgefertigten Holzbaurahmenelementen verkleidet. Nicht tragende Wände wurden als Holzrahmenbauweise, verkleidet mit Lehmbauplatten angenommen. Fenster wurden in diesem Szenario aus pulverbeschichtetem Aluminium ausgeführt. In den Szenarien A.1 und A.2 wurde aus brandschutztechnischen Gründen mit Mineralwolle gedämmt.

Abbildung 27: Schematische Darstellung der Untersuchungsszenarien (BBSR, eigene Darstellung)



Szenario B entspricht einem Neubau (vgl. Abbildung 27). Kubatur und Geschosse orientieren sich aus Gründen der Vergleichbarkeit und den städtebaulichen Rahmenbedingungen an Szenario A beziehungsweise am Referenzszenario. In Szenario B.1 (konventionell, Neubau) wurden Bauteile überwiegend in Stahlbeton ausgeführt. Alle weiteren Annahmen sind identisch mit Szenario A.1. In Szenario B.2 (ökologisch, Neubau) wurden Treppenhäuser sowie brandschutztechnisch relevante Bauteile und das Sockelgeschoss überwiegend in Stahlbetonbauweise umgesetzt. Alle weiteren vertikalen tragenden und nicht tragenden Bauteile wurden in Holzbauweise, horizontale Bauteile in Holz-Hybrid-Bauweise simuliert. Um eine bestmögliche Vergleichbarkeit zu erreichen, wurden die Bauteilaufbauten in den Szenarien jeweils mit gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten bilanziert. Energetisch wurde hier ebenfalls ein Standard KfW EH55 umgesetzt. Damit wurden in beiden Szenarien die Standards des Ordnungsrechtes eingehalten, die ergänzenden Standards des Bundesbaus (EGB 55 für Bestandsgebäude und EGB 40 für Neubauten) jedoch nicht berücksichtigt. In allen Szenarien wurde die Versorgung mit Fernwärme mit Flächenheizung, ergänzt durch PV-Fläche auf dem Dach sowie eine verpflichtende Abluftanlage, angenommen. Unterschiede zwischen der konventionellen und der ökologischen Variante bestehen in der Anlagenausführung für Kühlung im Sommer und in der Verwendung unterschiedlicher Kältemittel.

Abbildung 28: Konstruktionsaufbau Fassade in der Ausgangssituation Bestand und den Varianten des Umbaus beziehungsweise Ersatzneubaus (BBSR, eigene Darstellung)



Variantenvergleich zwischen konventioneller und überwiegend ökologischer Bauweise

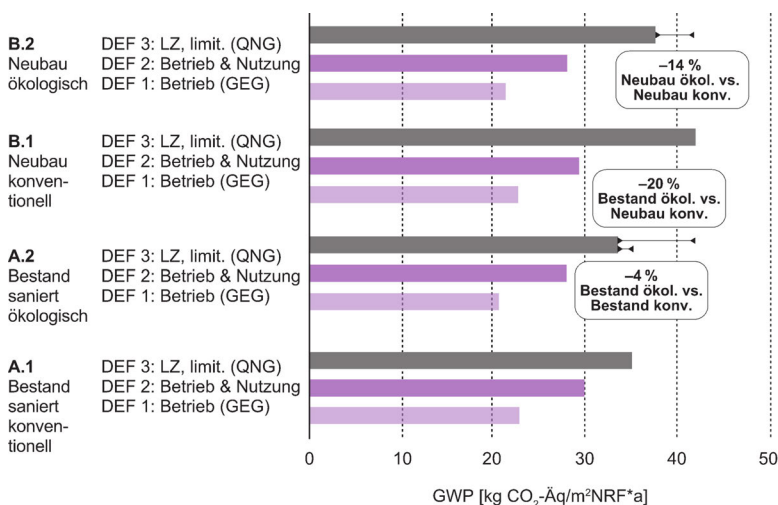
Die Varianten A.1 und B.1 (= konventionelle Bauweise) weisen erwartungsgemäß höhere Emissionen als A.2 und B.2 (= ökologische Bauweise) aus. Die Unterschiede liegen zwischen 4 % und 14 %. Die geringen Unterschiede gemäß den Definitionen DEF 1 (= Betrieb) und DEF 2 (= Betrieb & Nutzung) liegen auf der Hand; der Einfluss der Bauweise ist hier kaum relevant; lediglich Unterschiede des U-Wertes der Gebäudehülle führen zu leichten Differenzen in der ökobilanziellen Bewertung. Erst in der Untersuchung nach Definition DEF 3 (= Lebenszyklus, limitiert beziehungsweise QNG) wird der Einfluss der Bauweise deutlich; hier kann ein Unterschied von 14 % (beziehungsweise $5,1 \text{ kg CO}_2\text{-Äq/m}^2_{\text{NRF}^{\text{a}}}$) im Vergleich der Neubau-Varianten B.1 und B.2 festgestellt werden. Die Bestands-Varianten A.1 und A.2 hingegen weisen eine Differenz von nur 4 % auf, was auf das Vorhandensein der Primärkonstruktion bei den Sanierungsvarianten zurückzuführen ist (und damit auf den Wegfall der »Treiber« bei den grauen Emissionen).

- Ökobilanzielle Betrachtungen müssen bestmöglich den gesamten Lebenszyklus abbilden, um Steuerungsfunktion im Planungsprozess (insbesondere über die Nachfrage nach emissionsarmen Bauprodukten und Konstruktionen/Bauteilkompositionen) entfalten zu können.

Variantenvergleich zwischen Sanierungsmaßnahme und Neubaumaßnahme

Die Ökobilanz der vier Varianten zeigt, dass bei einer nicht isolierten Betrachtung der Betriebs- und Nutzungsphase, sondern Lebenszyklus-Orientierung (DEF 3 = Lebenszyklus, limitiert) die Sanierungsszenarien A. 1 und A. 2 geringere Emissionen erzeugen als die jeweils vergleichbaren Neubauszenarien B.1 und B.2. Selbst bei konventioneller Sanierung des Beispielgebäudes werden 20 % (beziehungsweise $6,9 \text{ kg CO}_2\text{-Äq/m}^2_{\text{NRF}^*\text{a}}$) im Vergleich zum konventionellen Neubau und 5 % ($1,8 \text{ kg CO}_2\text{-Äq/m}^2_{\text{NRF}^*\text{a}}$) im Vergleich zum Neubau mit ökologischen Baustoffen eingespart.

Abbildung 29: Vergleichende Darstellung des Einflusses alternierender Bauweisen entsprechend der vier untersuchten Neubau- und Bestandssanierungsszenarien auf das Treibhauspotenzial bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren (BBSR, eigene Darstellung)



→ Der Fokus auf Bestandssanierungen und Umbauten anstelle von Neubauten kann somit belegt werden und sollte durch Anreizmechanismen gefördert werden. Bei zukünftiger Verbesserung der Primärenergiefaktoren (hier:

Fernwärme) würden sich ökobilanzielle Vorteile der Bestandssanierung noch klarer abzeichnen.

- Der Unterschied der grauen Emissionen, die eine vorhandene Primärkonstruktion im Vergleich zum Neubau spart, wird umso deutlicher, je geringer der Anteil an Betriebsenergie (Modul B6) ist, sodass mit zunehmender Dekarbonisierung des Energiesektors der Einfluss der grauen Emissionen zunimmt.

Relativierend ist zu sagen, dass das Beispielgebäude aufgrund des gegebenen Ensembleschutzes in gleicher Kubatur, mit gleichem A/V-Verhältnis usw. als Neubau modelliert wurde. Die errechneten GWP-Werte von $36,88 \text{ kg CO}_2\text{-Äq/m}^2_{\text{NRF}^*\text{a}}$ nach DEF 3 (= Lebenszyklus, limitiert und damit QNG-Rechenkonvention) lassen nur auf eine mittlere Gebäudeperformance schließen. Dies ist vorrangig auf den großen Anteil der Betriebsenergie (Modul B6) unter anderem aufgrund des lokalen Primärenergiefaktors der Fernwärme zurückzuführen. Sofern Neubauten eine deutlich bessere Performance erreichen (zum Beispiel effizientere und suffizientere bauliche Lösung) kann der Unterschied zwischen Neubau- und Sanierungsvariante anders ausfallen.

- Ein ökobilanzieller Variantenvergleich unterschiedlicher Maßnahmenarten beziehungsweise baulicher Lösungen sollte zum Standard in Leistungsphase Null der HOAI beziehungsweise innerhalb von Machbarkeitsstudien (gegebenenfalls auch in folgenden Planungsphasen mit angepasster Detailtiefe und Berechnungssystematik) werden.

Vergleich unterschiedlicher Definitionsansätze und Rechenregeln

Die gemäß den vier beschriebenen Definitionen von (Netto-)THG-Neutralität und entsprechenden Rechen- und Bilanzierungsregeln auftretenden Unterschiede wurden anhand der Neubauvariante B.2 untersucht. Im Rahmen der Fallstudie wurde das **definitorische Delta auf maximal 50 %** (entspricht $20,5 \text{ kg CO}_2\text{-Äq/m}^2_{\text{NRF}^*\text{a}}$) beziffert (Differenz DEF 1 und DEF 4) unter der Annahme, dass DEF 4 (= 100 %) den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes und somit das Handlungsfeld Gebäude abdeckt und DEF 1 gemäß GEG einer minimalen Systemgrenze für eine mögliche Definition von THG-Neutralität entspricht.

Abbildung 30: Vergleichende Darstellung der vier beschriebenen Definitionen von Netto-THG-Neutralität bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren (BBSR, eigene Darstellung)

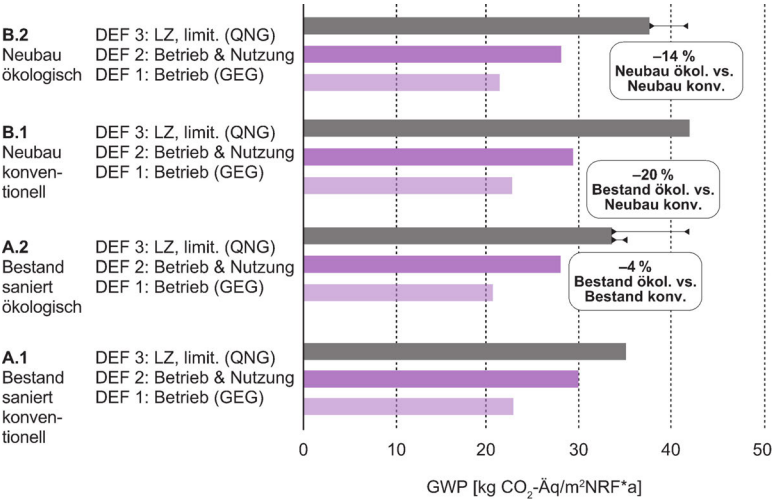
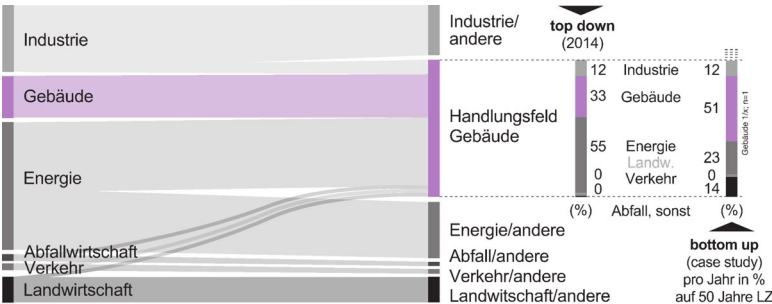


Abbildung 31: Prozentuale Top-down-Verteilung nationaler THG-Emissionen im Handlungsfeld Gebäude nach (Ramseier/Frischknecht 2020) sowie Bottom-up-Verteilung der ermittelten Treibhausgase auf Basis eigener Berechnungen und Annahmen für das Szenario B 2, DEF 4 mit sektoraler Zuordnung, wobei Anteile am Verkehrssektor, insb. in den Modulen A1-3 und B8, nicht ausgewiesen wurden (BBSR, eigene Darstellung)



Im Einzelnen deckte DEF 1 (Auswahl Module gemäß GEG beziehungsweise »(netto-)treibhausgasneutral im Betrieb«) 50 % der Maximalvariante gemäß DEF 4 ab; DEF 2 (Auswahl Module gemäß »(netto-)treibhausgasneutral in Betrieb und Nutzung« deckte 65 % der Maximalvariante gemäß DEF 4 ab; DEF 3 (Auswahl Module gemäß »(netto-)treibhausgasneutral im Lebenszyklus, limitiert«, basierend auf QNG) deckte 88 % der Maximalvariante gemäß DEF 4 ab.

- Die Auswertungen der Ökobilanz am Beispiel der Fallstudie zeigen, dass die Reduzierung einer Definition von Klima- oder THG-Neutralität auf die Betriebsenergie (Modul B6.1) zu kurz greift. Ein Großteil der Emissionen des Handlungsfelds Gebäude fielen in anderen Modulen und damit anderen nach KSG zugeordneten Sektoren an (ca. 50 %).

Die Ausschläge der Module im Rahmen der Case Study können wie folgt zusammengefasst werden: Vergegenständlichte Emissionen (Module A1-3, B1, B3-5, C3, 4), die dem Industriesektor zuzuordnen sind, betragen etwa 11,6 % der gesamten Ökobilanz. Die betriebsbedingten Emissionen, die nach den KSG-Sektoren Gebäude und Energie angerechnet werden, liegen bei 50,6 %; die Größenordnung im Energiesektor (Module A5, B2, B6.2, B6.3, B8, C1) bei 23,3 %, im Verkehrssektor (Module A4, C2, ohne A2) bei nur 0,1 % und im Sektor Abfallwirtschaft/Sonstiges (Modul C3, C4) bei 14,4 %. Der Landwirtschaftssektor muss aufgrund fehlender Aussagen in der Ökobilanz zu GWP_{luluc} bei einzelnen Holzbaustoffen vernachlässigt werden. Auffällige Differenzen zwischen der exemplarischen Top-Down- und Bottom-up-Gegenüberstellung (vgl. Abbildung 31 ??) sind im Bereich der Abfallwirtschaft zu beobachten (entspricht Modulen C3 und 4). Im Rahmen der Case Study wurden 14,4 % der gesamten THG-Emissionen des Gebäudes der Abfallwirtschaft zugeordnet. Die Top-down-Methode gibt hier einen Wert in Höhe von 0 % an. Es ist jedoch zu beachten, dass die zitierte Studie keine vollständigen Daten zum Rückbau und zur Entsorgung von Baustoffen liefert. Der Bottom-up-/Top-down-Vergleich ist als Zukunftskonzept für Plausibilitätsprüfungen zu verstehen.

- Um Emissionen am Ende des Lebenszyklus möglichst gering zu halten, ist das Konzept des **kreislaufgerechten Bauens** als zentraler Baustein der Gebäudeplanung umzusetzen.
- Um das Potenzial intersektoraler Strategien auszunutzen, ist es notwendig, alle Module des **Lebenszyklus** eines Gebäudes zu betrachten und parallel Buch zu führen (nach Quell- und Verursacherprinzip). Fehlende

Datengrundlagen, beispielsweise für pauschale Ansätze bisher nicht berücksichtigter Module sowie die Methodik des **Vereinfachten Verfahrens** in der Ökobilanz sind weiterzuentwickeln. Entsprechende Vorgaben sind möglichst schnell im **Ordnungsrecht**, namentlich GEG, und in den verlinkten Normen (DIN EN 15804:2022-03, DIN EN 15643:2021-12, DIN EN 15978:2012-10) vorzunehmen. Im **Förderrecht** des BEG beziehungsweise des darin enthaltenen QNG werden die Emissionen des **Handlungsfelds Gebäude** bereits deutlich umfänglicher betrachtet und bilden in der Case Study 88 % der Gesamtemissionen ab. Die Module D1 und D2 wurden normkonform informativ mitgeführt.

Spotlights: Untersuchung von Einzelaspekten

Kopplung von Umwelt- und Klimawirkpotenzialen an das planetare Grenzkonzept

Am Beispiel von drei Dämmmaterialien¹ mit vergleichbarem U-Wert – Mineralwolle-Dämmung, XPS- und Holzfaser-Dämmplatten – wurde exemplarisch untersucht, wie sich Baustoffe nicht allein in Bezug auf das Treibhauspotenzial (GWP) verhalten, sondern zusätzlich in Bezug auf weitere Umwelt- und Klimawirkindikatoren sowie auf die Speicherung von biogenem Kohlenstoff.

1 Für den Baustoffvergleich wurden exemplarisch marktübliche Materialien unabhängig von der Fallstudie ausgewählt.

Tabelle 7: Verwendete Datensätzen im Rahmen des Baustoffvergleichs (BBSR, eigene Darstellung)

Baustoff	Typ	Referenzfluss	U-Wert [W/mK]
Mineralwolle ²	Generic dataset	1,0 m ³	0,035
Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren) ³	Representative dataset	1,0 m ³	0,041
Extrudierter Polystyrol-Dämmstoff (XPS) ⁴	Generic dataset	1,0 m ³	0,035

Vergleicht man die drei oben genannten Baustoffe bei gleichwertiger Wärmeleitfähigkeit, das heißt gleiche Dämmeigenschaften und somit gleiche Auswirkungen auf Modul B6.1, sind deutliche Unterschiede bei ihrem GWP-Anteil in den Modulen A1-3, B4, C3 und C4 (graue Emissionen) feststellbar. Auch bei weiteren potenziellen Umwelt- und Klimawirkungen und entsprechenden Indikatoren ist der Ausschlag pro Baustoff unterschiedlich (siehe Abbildung 33).

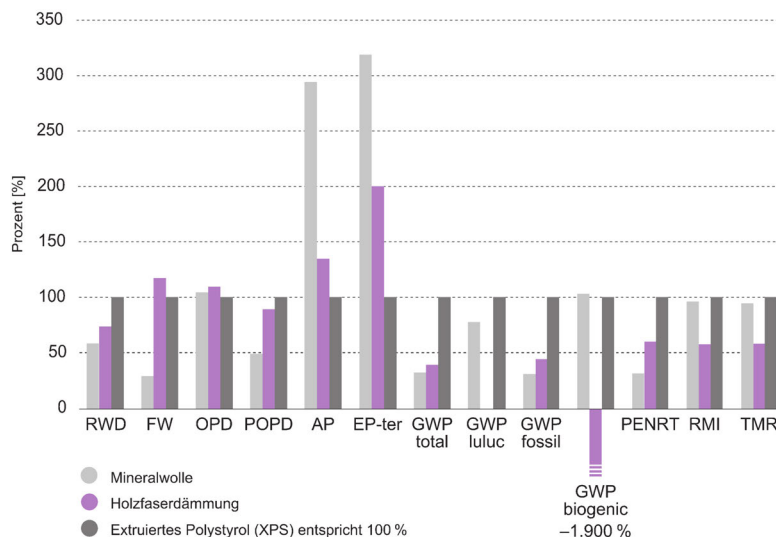
Der extrudierte Polystyrol-Dämmstoff (XPS) wurde als Referenzbaustoff (= 100 %) angenommen. Das Treihauspotenzial (GWP_{total}) des Holzfaserdämmstoffes liegt im Vergleich bei nur rund 40 %. In Bezug auf den Klimawandel wäre der Holzfaserdämmstoff somit als deutlich emissionsärmere Variante zu bevorzugen. Betrachtet man aber beispielsweise den Indikator Frischwasserverbrauch (FW) erreicht der Holzfaserdämmstoff mit 118 % ungünstigere Werte als XPS. Mit 31 % im Vergleich zum Referenzbaustoff liegt bei Mineralwolle der Frischwasserverbrauch besonders günstig, hat allerdings bei Versauerungspotenzial (AP) und Überdüngungspotenzial (EP) vergleichsweise hohe Werte von 294 % (AP) beziehungsweise 319 % (EP).

2 https://oekobaudat.de/OEKOBau.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=4fa62445-e59f-4874-99e5-49cec91967e0&version=20.21.060&stock=OBD_2021_II&lang=de.

3 https://oekobaudat.de/OEKOBau.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=34633906-b5d4-48d8-adf4-90037a7499d9&version=00.00.053&stock=OBD_2021_II&lang=de.

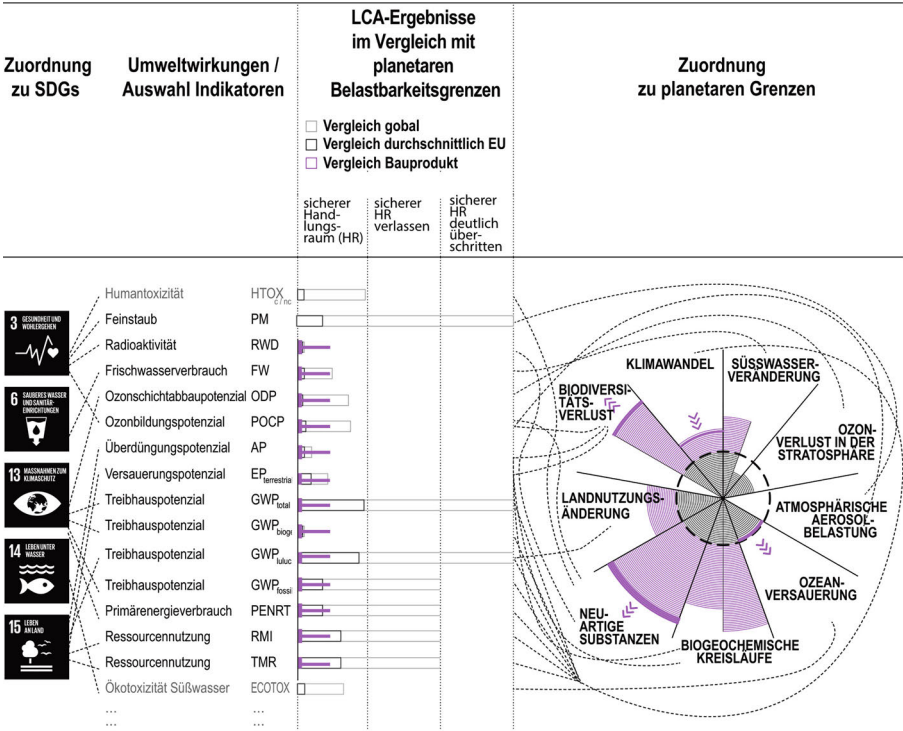
4 https://oekobaudat.de/OEKOBau.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=37f50a3e-5445-4bce-8eda-98f01dba441f&version=20.21.060&stock=OBD_2021_II&lang=de.

Abbildung 32: Auswertungen des Baustoffvergleichs (Referenz XPS = 100 %-Ansatz je Indikator, das heißt keine absoluten Werte, sondern prozentuale Abweichungen, in jeder Wirkungskategorie dargestellt) über die Betrachtung der THG-Emissionen hinaus und in Bezug auf ein erweitertes Indikatoren-Set (BBSR, eigene Darstellung)



Bestehende Vorschläge, die errechneten Werte einer Ökobilanz den Wirkkategorien der planetaren Grenzen zuzuordnen, sind sinnvoll, um nicht den isolierten Ansatz der Reduzierung des Klimawandels auf Kosten anderer Schutzziele zu verfolgen. Die folgende Grafik (Abbildung 33) skizziert zum einen eine solche mögliche Zuordnung nach (Sala/Crenna/Secchi, et al. 2021) und gibt zum anderen eine vorgeschlagene Auswahl an Indikatoren wieder.

Abbildung 33: Anregung für eine Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von Gebäuden anhand der planetaren Grenzen (BBSR, eigene Darstellung nach Sala/Crenna/Secchi, et al. 2021)



→ Um durch Ökobilanz ermittelte Werte greifbarer und praktikabel zu gestalten, wird vorgeschlagen, die methodische Systematik und grafische Darstellung analog (Sala/Crenna/Secchi, et al. 2021) anzuwenden und in bestehende Instrumente der Ökobilanzierung zu integrieren. Die Klima- und Umweltwirkpotenziale von Baustoffen würden so über einen produktspezifischen Ausschlag in unterschiedliche Richtungen an die planetaren Grenzen gekoppelt werden und Rückschlüsse auf globale Auswirkungen zulassen. Auch Vorteile, zum Beispiel bei Verwendung von Low-carbon-Produkten, würden damit direkt visualisiert und nicht erst indirekt über ein günstigeres Ergebnis der Gesamt-Gebäudebilanz hervorgehoben werden können.

Die Frage, welche Art und Auswahl von Indikatoren bundeseinheitlich vorgegeben werden sollte, bringt folgenden Konflikt mit sich: Einerseits ist das Ziel, eine möglichst ganzheitliche Nachhaltigkeitsbetrachtung zu fordern, was eine breite Auswahl von sicheren Indikatoren voraussetzt. Andererseits besteht der Bedarf nach der Reduktion von Komplexität, um die Lebenszyklusanalyse möglichst schnell in die Praxisanwendung zu bringen (»Mainstreaming«) sowie in die Logik der globalen Berichterstattung einzubetten.

Am Beispiel von zwei nach aktuellen Bewertungsstandards nicht im Indikatoren-Set betrachteten Wirkkategorien wird nachfolgend die Notwendigkeit von zusätzlichen Indikatoren angerissen.

Beispiel radioaktiver Abfall (RWD)

Das Europäische Parlament lehnte am 7. Juni 2022 den delegierten Rechtsakt zur Taxonomie-Verordnung der Kommission nicht ab. So können nun Atomenergie- und Erdgasaktivitäten unter bestimmten Voraussetzungen in die Liste der ökologisch nachhaltigen Wirtschaftstätigkeiten nach der sogenannten EU-Taxonomie aufgenommen werden.⁵

Am Beispiel RWD wurden exemplarisch ein österreichischer und ein französischer Baustoff verglichen. Bei dem französischen Baustoff ergibt sich ein etwa doppelter Anteil an radioaktivem Abfall. Der Faktor ist unter anderem ableitbar aus den Anteilen verschiedener Energieträger am Primärenergieverbrauch in der EU.

Tabelle 8: Verwendete Datensätzen im Rahmen des Baustoffvergleichs und in Bezug auf den Indikator RWD (BBSR, eigene Darstellung)

PENRT	RWD	RWD/PENRT	Herkunft	Datensatz
91,82 MJ	2,29 g	0,025 g/MJ	Österreich	Akustikplatte ⁶
84,88 MJ	4,58 g	0,054 g/MJ	Frankreich	Akustikplatte ⁷

5 Inkrafttreten ab 1. Januar 2023.
6 https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=daf4db38-add6-47b0-bd72-4140a739c263&version=00.01.000&stock=OBD_2023_I&lang=de.
7 https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=4c57ddb8-c44f-4865-9cd4-da650e240acd&version=00.01.000&stock=OBD_2021_II&lang=de.

Im Sinne dieser Entwicklung ist der Indikator »Menge an radioaktivem Abfall« (RWD) als zusätzlicher Kernindikator für die ökobilanzielle Betrachtung zu empfehlen, da Baustoffe je Herkunftsland (und damit dem jeweils hinterlegten Energie- beziehungsweise Strom-Mix) sehr unterschiedliche Wirkpotenziale aufweisen.

Beispiel Frischwasserverbrauch (FW)

Die Gegenüberstellung der Module (vgl. Abbildung 33 ??) hat gezeigt, dass der Wasserverbrauch im Betrieb (Modul B7) einen großen Ausschlag bezüglich der Umweltwirkpotenziale der Case Study verursacht. Vergleicht man den Frischwasserverbrauch (Indikator FW), der zur Baustoffherstellung benötigt wird, mit dem Verbrauch an Frischwasser, der sich aus der Gebäudebenutzung ergibt, liegt das Verhältnis bei etwa einem zu drei Vierteln (23 % aus Baustoffherstellung zu 77 % aus Nutzung).

Tabelle 9: Vergleich Frischwasserverbrauch (Indikator FW) zur Baustoffherstellung und aus Gebäudebenutzung (BBSR, eigene Darstellung)

	FW-Verbrauch _{gesamt} /a [Liter]	FW-Verbrauch _{gesamt} [Liter]	Anteil [%]
FW-Verbrauch Herstel- lung Baustoffe	1.730.430,00	86.521.500,00	23
FW-Verbrauch Nutzungs- phase	5.758.000,00	287.900.000,00	77
FW-Verbrauch gesamt	7.488.430,00	374.421.500,00	100

Das Thema Frischwasserverbrauch ist bislang unterrepräsentiert. Mit Blick auf die bereits überschrittene planetare Grenze ist dringend die Reduzierung von Verbräuchen anzustreben.

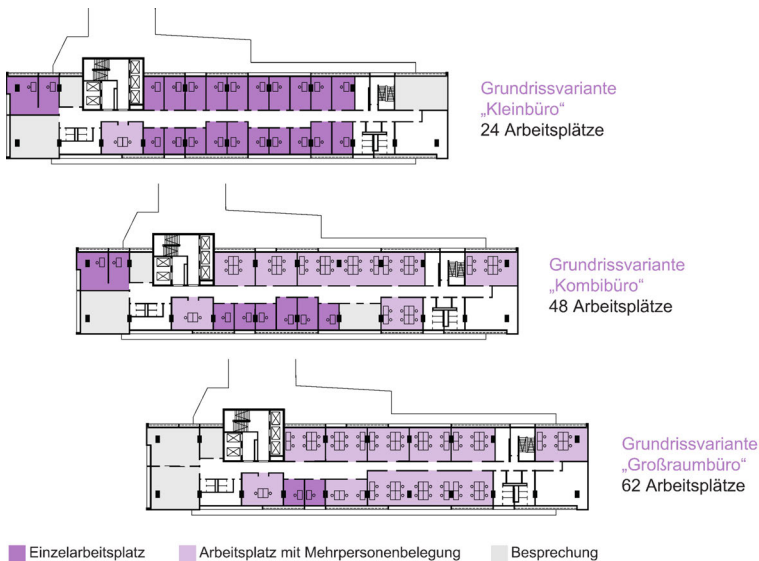
- Der Indikator GWP 100 reicht nicht aus, um eine umfassende Betrachtung von Umwelt- und Klimawirkpotenzialen abzubilden. Eine geeignete Auswahl an Indikatoren ist zu treffen und verbindlich in ökobilanziellen Berechnungen auszuwerten, um sowohl eine praktikable Anzahl an Kriterien als auch Auswirkungen auf andere planetare Grenzen abbilden zu können. Ei-

ne EU-weite Definition ist in Anlehnung an Amendment 2 (ISO 14044:2006/ FDAM 2:2020; DIN EN 18504) anzustreben.

Veränderte Arbeitswelten und neue Bezugsgrößen

Als Stellschrauben zur Reduzierung von THG-Emissionen von Gebäuden werden in der Regel Bauweisen und Baustoffe miteinander verglichen. Nutzungsbezogene planerische Einsparungen stehen dabei oft im Hintergrund. Für das Gebäude liegen drei Grundrissvarianten beziehungsweise Bürotypologien vor: »Großraumbüro« (62 Mitarbeitende), »Kombibüro« (48 Mitarbeitende) und »Kleinbüro« (24 Mitarbeitende). Teilt man die NRF der Büroetagen durch die Anzahl der möglichen Büroarbeitsplätze, ergibt sich ein Flächenbedarf/Kopf. Teilt man die Gesamtemissionen der Büroetagen durch die Anzahl der möglichen Büroarbeitsplätze, ergibt sich ein GWP/Kopf, das als zukünftiges Benchmark tauglich wäre.

Abbildung 34: Exemplarische Darstellung der drei Grundrissvarianten »Kleinbüro« (oben), »Kombibüro« (Mitte) und »Großraumbüro« (unten) (BBSR, eigene Darstellung)



Im Referenzszenario der Case Study der betrachteten Fallstudie (Variante A.2 – Sanierung, ökologisch) werden 33 % der Bürofläche als »Großraumbüro«, 33 % als »Kombibüro« und 33 % als »Kleinbüro« ausgelegt und damit wird eine mittlere Belegungsdichte (672 Mitarbeitende auf 14 Etagen) erzielt. Der Referenzwert für den Vergleich liegt bei $22 \text{ m}^2_{\text{NRF}}/\text{Kopf}^* \text{a}$ für den personenbezogenen Flächenbedarf und $33 \text{ kg CO}_2\text{-}\ddot{\text{A}}\text{q}/\text{m}^2_{\text{NRF}^* \text{a}}$ (bei 50 Jahren Nutzungsdauer und Rechenregeln nach DEF 3 gemäß QNG) für die flächenspezifischen THG-Emissionen pro Jahr. Die Betrachtung in GPW/Kopf beziehungsweise GWP/Kopf*Nutzungsstunde kann wiederum als GWP/Flächenbezug dargestellt werden, wenn man von den vermiedenen Emissionen zum Bau neuer Büros ausgeht.

Bei den Varianten »Großraumbüro« und »Kombibüro« entfallen Teile der Verkehrs- und Konstruktionsflächen. Möblierungsvarianten können aufgrund der flexibleren Grundrissgestaltung flächensparend arrangiert werden. Die Emissionen der Innenbauteile reduzieren sich. Der Bundesbau, der überwiegend Einzelbüros umsetzt, sollte verstärkt Mischungen von Bürotypologien planen.

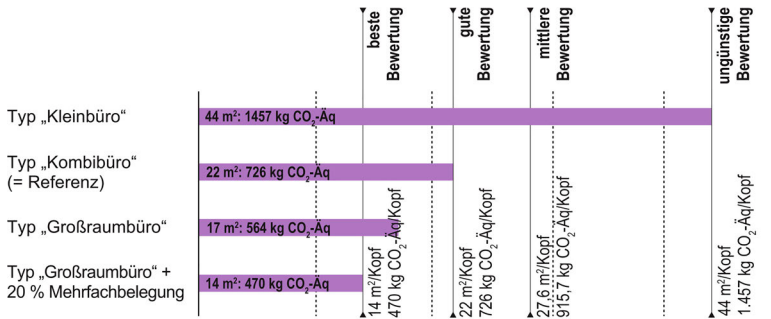
Einsparpotenziale, resultierend aus verschiedenen Belegungsdichten, werden im Folgenden verglichen.

- Eine hohe Belegungsdichte (hier exemplarisch ausschließlich »Großraumbüro«) führt bei gleichbleibender Anzahl an Arbeitsplätzen zu einer Reduktion der gesamten THG-Emissionen in Höhe von rd. **22 %** (-112 t $\text{CO}_2\text{-}\ddot{\text{A}}\text{q/a}$).
- Eine hohe Belegungsdichte (hier exemplarisch ausschließlich »Großraumbüro«) und Mehrfachbelegung (20 %⁸) führt zu einer Reduktion der gesamten THG-Emissionen in Höhe von **rd. 35 %** (-177 t $\text{CO}_2\text{-}\ddot{\text{A}}\text{q/a}$).
- Eine geringe Belegungsdichte (ausschließlich »Kleinbüro«) führt zu einem Anstieg an THG-Emissionen in Höhe von rd. **100 %** (+498 t $\text{CO}_2\text{-}\ddot{\text{A}}\text{q/a}$).

Für die Case-Study konnten Bewertungsmaßstäbe beziehungsweise Benchmarks wie in der folgenden Abbildung dargestellt abgeleitet werden. Für eine Übertragbarkeit von Bewertungsmaßstäben für den Büro- und Verwaltungsbau im Allgemeinen müssten weitere Untersuchungen vorgenommen werden.

8 Eine Mehrfachbelegung in Höhe von 20 % ist begründet in Abwesenheit der Mitarbeitenden, mobilem Arbeiten beziehungsweise Homeoffice sowie Teilzeitstellen.

Abbildung 35: Vergleich unterschiedlicher Belegungsdichten hinsichtlich $\text{NRF}/\text{Kopf}^*a$ und $\text{GWP}/\text{Kopf}^*a$ im Durchschnitt (BBSR, eigene Darstellung)



Einsparpotenziale, die aus einer Mehrfachbelegung bzw. Multicodierung von Flächen (zum Beispiel mehrere Nutzungen zu verschiedenen Tageszeiten) resultieren, werden im Folgenden verglichen.

- Das Referenzszenario Büronutzung »Kombibüro« ist mit einem GWP von 0,40 kg CO_2 -Äq/(Kopf *a *Nutzungsstunde) beziffert (unter Annahme folgender Belegungsdauer: 8 h pro Tag; 5-Tage-Belegung mit 230 Arbeitstagen pro Jahr).
- Die Werte für die Belegungsvariante »Großraumbüro« liegen damit bei 0,31 kg CO_2 -Äq/Kopf *a *Nutzungsstunde, für »Kleimbüro« bei 0,81 kg CO_2 -Äq/Kopf *a *Nutzungsstunde.

Eine Mehrfachbelegung bzw. Multicodierung (Nutzung von Teilbereichen zu 15 % der $\text{NRF}_{\text{gesamt}}$ in den Abendstunden und am Wochenende) führte in der Case Study zu einer Reduktion des $\text{GWP}/\text{Kopf}^*a$ um 7,5 % bei absoluten Emissionen in Höhe von 0,37 kg CO_2 -Äq/Kopf *a *Nutzungsstunde.

- Die Einsparungspotenziale, die sich durch ein gut funktionierendes, bedarfsgerechtes Nutzungs- und Entwurfskonzept ergeben, können einen maßgeblichen Beitrag zur Reduzierung von THG-Emissionen leisten. Als besonders effektiv haben sich im Rahmen der Fallstudie der Verzicht auf Einzelbüros und Konzepte der Mehrfachbelegung (»Desk Sharing«) erwiesen. Die Bezugsgröße GWP/Kopf sollte zum einen umfassend evaluiert werden und könnte als ergänzender Indikator in Bedarfsprognosen beziehungsweise in die Bedarfsplanung von Bauvorhaben integriert werden.

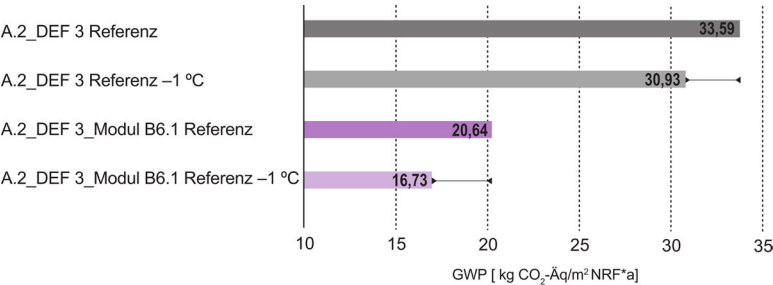
Der Flächenbezug/Kopf bleibt andererseits nötig, um Rebound-Effekte zu vermeiden.

- Neben der Mehrfachbelegung ist auch die teilweise Multicodierung von Flächen eine mögliche Maßnahme; der eine Erweiterung des vorgenannten Indikators auf $\text{GWP/Kopf} \cdot \text{Nutzungsstunde}$ zugrunde liegt. Je nach untersuchtem Szenario sind unterschiedliche THG-Einsparpotenziale möglich. Ein weiterer Aspekt der Multicodierung von Flächen besteht neben den rechnerisch nachgewiesenen Vorteilen in der Nutzungsmischung am Standort, insbesondere im Hinblick auf belebte Quartiere und die Förderung von Baukultur.

Anpassung der Innenraumtemperatur

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung der THG-Emissionen liegt in der Reduzierung des Heiz- beziehungsweise Kühlenergiebedarfs durch geändertes Nutzerverhalten.

Abbildung 36: Einfluss der Reduzierung der Innenraumtemperatur um 1 °C in den Büroetagen während der Heizperiode auf das Treibhauspotenzial gesamt und in Bezug auf Modul B6.1 (BBSR, eigene Darstellung)



Im Referenzszenario (Variante A.2 – Sanierung, ökologisch) wird der Einfluss der Reduzierung der Innenraumtemperatur um 1 °C in den Büroetagen während der Heizperiode und damit der Reduktion des Heizenergiebedarfs untersucht. Statistische Auswertungen belegen Einsparungen des Heizenergiebedarfs zwischen 6 % (EnergieSchweiz 2021) und 12 % (Richter/Ender/Hartmann, et al. 2003: 45). Da das Beispielgebäude einen hohen energetischen Emissionsanteil zeigt, wurde ein 12 %-iges Reduktionspotenzial angenommen.

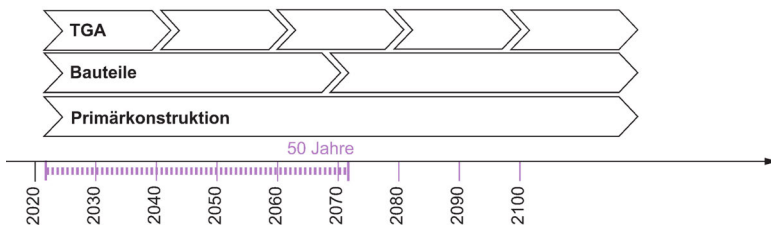
Der Referenzwert der Variante A.2, DEF 3 (QNG) liegt bei $33,59 \text{ kg CO}_2\text{-}\ddot{\text{A}}\text{q/m}^2_{\text{NRF}^*\text{a}}$. Bei Absenkung der Innenraumtemperatur liegt die flächenspezifische jährliche THG-Emission bei $30,93 \text{ kg CO}_2\text{-}\ddot{\text{A}}\text{q/m}^2_{\text{NRF}^*\text{a}}$ und zeigt damit eine Einsparung von 8 %. Je nach untersuchtem Szenario sind unterschiedliche THG-Einsparpotenziale durch Absenkung der Innenraumtemperatur in der Heizperiode möglich.

Hierbei handelt es sich um eine allgemeine Abschätzung des Reduktionspotenzials, welches durch eine thermisch-dynamische Gebäudesimulation zu konkretisieren wäre. Aspekte des sommerlichen Wärmeschutzes sollten gerade in Anbetracht des voranschreitenden Klimawandels und neuer Erkenntnisse in Bezug auf ein adaptives Komfortmodell identisch diskutiert werden.

Zeitpunkt des Anfallens von Emissionen im Lebenszyklus

In ökobilanziellen Betrachtungen ist als Rechenkonvention ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren festgelegt. Dabei kann die Primärkonstruktion zumeist deutlich länger genutzt werden. Der Austauschzyklus von Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) wird deutlich geringer veranschlagt.

Abbildung 37: Vergleich der Betrachtungszeiträume für die Primärkonstruktion, Bauteile und TGA (BBSR, eigene Darstellung)

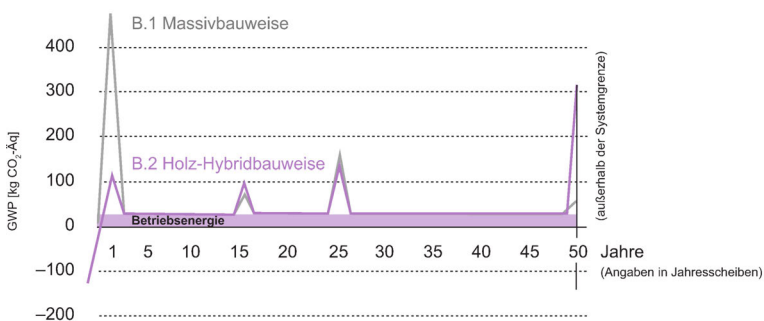


Vor dem Hintergrund des THG-Neutralitätsziels bis 2045 und dem geringen verbleibenden Zeitbudget ist neben der gesamt-bilanzierten Größenordnung grauer (das heißt nicht der Betriebs- beziehungsweise Nutzungsphase zuzuordnender) Emissionen auch der Zeitpunkt ihres Anfallens relevant. Heute geplante Bauwerke werden als Gebäudebestand im Jahr 2045 den ersten Austauschzyklus bezüglich der technischen Gebäudeausrüstung durchlaufen.

- Die Wahl der Bauweise, aber auch die Konzeption einer robusten TGA (Vorteil von Lowtech-Lösungen im Vergleich zu revisionsanfälligen technikzentrierten Konzepten) sowie die Weiterverwendung von Primärkonstruktionen (Vorteil von Bestandssanierung anstelle Abriss und Neubau, sofern anpassungsfähige Grundrisse und Raumhöhen bedacht wurden) liegen auf der Hand.
- Die Lebenszyklusbetrachtung ermöglicht es, anfallende Emissionen jahresspezifisch abzubilden. Die aktuelle Bilanzierungspraxis nivelliert diese Werte auf 50 Jahre. Dadurch werden Umwelt- und Klimawirkpotenziale, die sich sofort, beispielsweise über die Auswahl der Materialität, ergeben, weniger deutlich und in die Zukunft verschoben. Die Aufnahme einer zeitlichen Verortung von Emissionen sollte Bestandteil der Ökobilanz werden.

In der nachfolgenden Abbildung werden die gewählten Bauweisen (Variante B.1 = konventionell, das heißt Massivbauweise, sowie Variante B.2 = ökologisch, das heißt Holz-Beton-Hybridbauweise) bezüglich Größenordnung und Zeitpunkt des Anfallens verglichen und den Sanierungsvarianten mit Erhalt der Primärkonstruktion gegenübergestellt.

Abbildung 38: Aufteilung des absoluten Treibhauspotenzials als Jahresscheiben dargestellt für eine exemplarische konventionelle Bauweise (B1) und eine ökologische Bauweise (B2) (BBSR, eigene Darstellung)



Die Abbildung 38 verdeutlicht, dass, auch bevor die Betriebsenergie (insbesondere Modul B6.1) etwa aufgrund hoher Energieeffizienz und guter Gebäudeplanung gen null geht, der Fokus bereits jetzt auf die verbleibenden Peaks

gelegt werden sollte. Diese entsprechen den grauen Emissionen, die für die Primärkonstruktion, sonstige Bauteile und TGA bei der Errichtung, bei Austausch und Erneuerung und in der Endbehandlung (End of Life – EoL) anfallen.

Die Fallstudie zeigt, dass bei der ökologischen Bauweise (B.2 = ökologisch, das heißt Holz-Beton-Hybridbauweise) ein Großteil der Emissionen am Ende des Lebenszyklus anfallen.

- Daraus ergibt sich, dass Holzbauweisen vornehmlich dann ihre Vorteile ausspielen können, wenn kreislauffähige Konstruktionen gewählt und Bauteile wieder- beziehungsweise weiterverwendet werden können, um die Peaks am Ende des Lebenszyklus zu vermeiden.

Bei der konventionellen Bauweise (B.1 = konventionell, das heißt Massivbauweise) fallen die Emissionen mit enormem Ausschlag am Anfang an.

- Im Vergleich zur ökologischen Bauweise ist es hier umso wichtiger, den Peak aufgrund der Herstellung am Anfang des EoL zu verringern und beispielsweise emissionsintensive Baustoffe zu substituieren.
- Bestandssanierungen haben den Vorteil, den Ausschlag am Anfang deutlich zu reduzieren, da ein Großteil der grauen Emissionen durch Weiternutzung der Primärkonstruktion bereits gebunden ist.

EXKURS: Kreislaufgerechtes Bauen

(siehe auch BBSR-Forschungsprojekt: Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft)

Ein weiterer Aspekt des ressourcenschonenden Bauens ist die Kreislauffähigkeit der eingesetzten Baumaterialien. Voraussetzung für die Kreislauffähigkeit ist eine möglichst gute Rückbaufähigkeit der Baukonstruktion. Wird ein hochwertiges Closed-Loop-Recycling angestrebt, spielt die sortenreine Trennung der einzelnen Materialgruppen eine entscheidende Rolle. Materialien mit möglichst geschlossenen Kreisläufen bedingen darüber hinaus eine hohe Verwertungseignung.

Die Verwertungseigenschaften von Baumaterialien sind im Baustoffsystem eingepreist. So lassen sich zum Beispiel Metalle leichter im Recycling-Kreislauf führen als mineralische Baustoffe, deren Bindemittel nicht rever-

sibel sind. Weiterhin verändert sich die Verwertungseigenschaft von Bauteilen, wenn Materialgruppen mit unterschiedlichen Verwertungswegen miteinander verbunden werden. So führen Materialverbünde von organischen und anorganischen Stoffen, wie zum Beispiel Holz/Zement (sogenannte Sauerkrautplatte) oder Beton/EPS (sogenannter Dämmbeton), zu Kombinationen, die weder thermisch noch werkstofflich verwertet werden können.

Wie eine möglichst kreislaufgerechte Baukonstruktion geplant werden kann, wird perspektivisch im BNB-Kriterium »Kreislauffähigkeit« beschrieben. Es wurde eine neue praktikable Klassifizierung von Baumaterialien beziehungsweise Bauprodukten und deren Fügung zum Bauteil gemäß sogenannter »End of Life (EoL)«-Klassen im BBSR entwickelt.

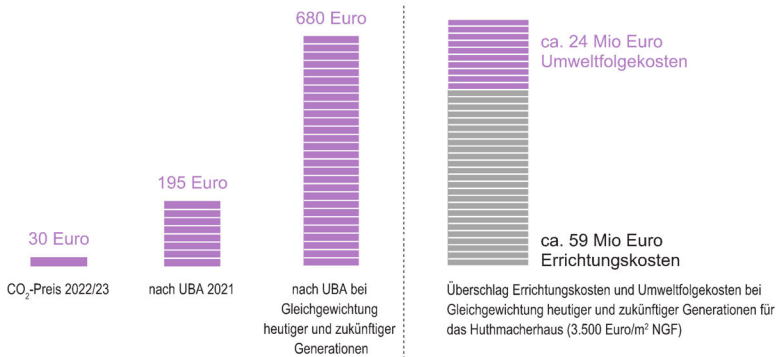
Die Studie ist auf der Website des BBSR: <https://www.bbsr.bund.de/abrufbar>.

Abschätzung externalisierter Umweltkosten

Im Zuge von Wirtschaftlichkeits- beziehungsweise Lebenszykluskostenberechnungen sind die gesellschaftlichen Kosten von Umweltbelastungen noch nicht beziehungsweise nicht ausreichend in Bezug genommen.

Anhand der Case Study sollen daher externalisiert auftretende Umweltschäden überschlägig monetär ausgewiesen und den investiven Kosten gegenübergestellt werden. Als CO₂-Preis je t CO₂-Äq wurde gemäß § 10 im Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz – BEHG) ein spezifischer Preis zwischen 25 Euro/t CO₂-Äq für das Jahr 2021 bis 55 Euro/t CO₂-Äq für das Jahr 2025 festgelegt. Das UBA kommt in seinen Studien zu deutlich höheren Werten von 195 Euro beziehungsweise 680 Euro bei einer Gleichgewichtung heutiger und zukünftiger Generationen (Umweltbundesamt 2020a). BEHG und Methodenkonvention des UBA sind methodisch unterschiedlich. BEHG beziffert, anders als das UBA, keine Umweltkosten, sondern bepreist das Recht zur Emission 1 t CO₂.

Abbildung 39: Darstellung möglicher Umweltfolgekosten im Verhältnis zu überschlägig ermittelten Investitionskosten am Beispiel der Case Study bei einer Gleichgewichtung heutiger und zukünftiger Generationen (BBSR, eigene Darstellung)



Für den Fall eines Neubaus in konventioneller Bauweise (B.1) mit einem ermittelten GWP von 41,97 kg CO₂-Äq/m²_{NRF}^a (gemäß DEF 3) wurden für den gesamten Lebenszyklus externalisierte Umweltfolgekosten in Höhe von rund 1.065.000 Euro/6.942.000 Euro/24.209.000 Euro überschlägig ermittelt.

Unter der konservativen Annahme investiver Baukosten/Errichtungskosten (KG 300 + 400) in Höhe von 59.500.000 Euro (3.500 Euro pro m²_{NRF}) wäre dies eine Steigerung der Kosten von fast 59 % bei einer Gleichgewichtung heutiger und zukünftiger Generationen und bezogen auf den Lebenszyklus nach QNG und ohne Berücksichtigung dynamischer Steigerung der Umweltfolgekosten.

- Solange die gesellschaftlichen Kosten von Umwelt- und Klimabelastungen nicht transparent sind, fehlt ein erheblicher Anreiz, sparsam mit den verbleibenden Ressourcen umzugehen.
- Gesellschaftliche Kosten von Umwelt- und Klimabelastungen werden aktuell nicht ausreichend einbezogen beziehungsweise zulasten zukünftiger Generationen verlagert. Eine Gleichgewichtung heutiger und zukünftiger Generationen ist demnach aktuell nicht gegeben. Beispielsweise könnten in einem ersten Schritt zusätzlich zu den eigentlichen Baukosten Umweltfolgekosten ausgewiesen werden. In einem zweiten Schritt könnten diese entweder in Form von »Umweltfolgekosten-Vorauszahlungen« eingefordert oder durch bewusste Verbesserungen am erweiterten Standort über Anreizsysteme verrechnet werden.

Zusammenstellung des Reduktionspotenzials emissionsmindernder Maßnahmen

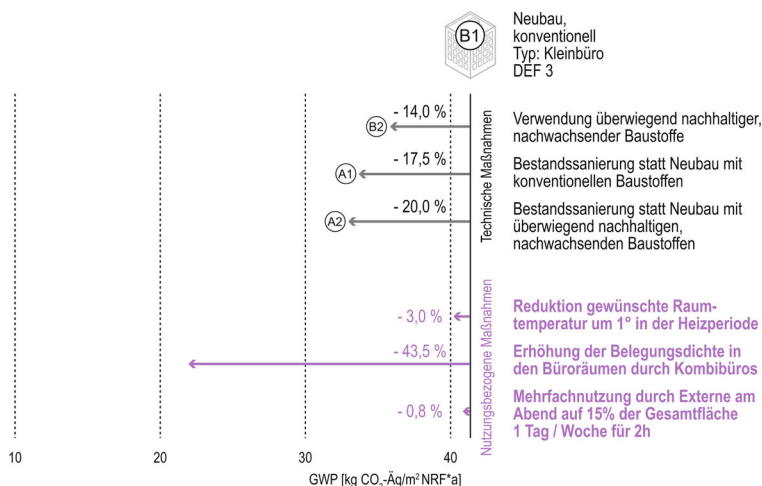
Abschließend wurden die isoliert untersuchten emissionsmindernden Maßnahmen im Vergleich betrachtet. Bauliche Maßnahmen wurden ebenso betrachtet wie nutzungsbezogene Maßnahmen.

Bezogen auf die Case Study lag das maximale Reduktionspotenzial durch technische und bauliche Maßnahmen bei rund 20 %. Als initiale Maßnahmen wurden die modellierten Baustoffe ersetzt durch überwiegend nachhaltige und nachwachsende Materialien. Alternativ wurde außerdem ein Szenario modelliert, bei dem die Primärkonstruktion des Bestands erhalten bleibt und Sanierungen mit konventionellen sowie, im Vergleich, mit überwiegend nachhaltigen und nachwachsenden Materialien durchgeführt wurden. (Ergänzung: Weiteres Reduktionspotenzial besteht in der Minderung der Betriebsenergie. Da TGA und Bauteile mit identischen energetischen und bauphysikalischen Eigenschaften angelegt wurden, ist dieses Potenzial hier nicht abgebildet.) Das Reduktionspotenzial zwischen einer konventionellen Bestandssanierung und einer nachhaltigen Bestandssanierung fällt geringer aus als das Reduktionspotenzial zwischen einem konventionellen Neubau und einem überwiegend nachhaltigen Neubau. Dies ist darin begründet, dass die Bestandssanierung grundsätzlich bereits ein geringeres GWP aufweist, da ein Großteil der Primärkonstruktion übernommen wird.

Das maximale Reduktionspotenzial durch nutzungsorientierte (Suffizienz-)Maßnahmen lag bei rund 48 %. Ein besonders großer Einfluss spielte hierbei eine freie Grundrissgestaltung. Hierdurch konnten statt Einzelbüros Kombibüros mit einer höheren Belegungsdichte umgesetzt werden. Die Praktikabilität und Angemessenheit der Grundrissgestaltung wurden zeichnerisch überprüft. Das Reduktionspotenzial im Bereich Belegungsdichte und Grundrissgestaltung lässt sich über die vermiedenen Emissionen zum Bau neuer Büros abbilden. Die Reduktion der gewünschten Raumtemperatur um 1 °C während der Heizperiode hatte einen deutlich geringeren, aber dennoch nennenswerten Effekt auf das Reduktionspotenzial, zumal die Raumtemperatur möglicherweise weiter abgesenkt werden könnte. Der Einfluss von mehrfachgenutzten Räumen außerhalb der typischen Bürozeiten mit den Annahmen, dass einmal pro Woche 15 % der Gesamtfläche für zwei Stunden durch Dritte genutzt wird, hatte einen vergleichsweise marginalen Einfluss auf das Reduktionspotenzial, insbesondere wenn man diese mit erhöhten Aufwänden durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen und Personal ins Ver-

hältnis setzt. (Ergänzung: Intensivere Mehrfachnutzungskonzepte können perspektivisch überprüft werden).

Abbildung 40: Reduktionspotenzial baulicher und nutzungsbezogener Maßnahmen im Rahmen der Case Study (BBSR, eigene Darstellung)



→ Nutzungsbezogene (Suffizienz-)Maßnahmen können ebenso wie baulich-technische Maßnahmen einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz im Bauwesen leisten. Nutzungsbezogene Maßnahmen oder Suffizienzmaßnahmen spielen jedoch aktuell im Bereich der Förderung und des Ordnungsrechtes eine untergeordnete Rolle und sollten künftig stärker priorisiert werden.

Vorschlag einer praktikablen Definition und Rechenkonvention für ein »klima- und ressourcenschonendes Gebäude«

Basierend auf den vorgestellten Untersuchungsergebnissen der Case Study wird im Folgenden ein Vorschlag einer praktikablen Definition und Rechenkonvention für »klima- und ressourcenschonende« Gebäude formuliert. Die vorgeschlagene Definition ist als Diskussionsbeitrag zur Klima- und Ressour-

censchonung im Handlungsfeld Gebäude zu verstehen; entsprechend schließt sie Klimaneutralität ein und reicht darüber hinaus.

- (1) Da Bauen und Umbauen in den meisten Fällen einen ökologischen Fußabdruck hinterlässt, kann der Begriff des treibhausgasneutralen Gebäudes nur im Sinne eines Berechnungsmodells für die längerfristige Kompensation von Klima- und Umweltschäden, die derzeit verursacht werden, bezeichnet werden.
- (2) Da eine absolute THG-Neutralität nicht realistisch ist, wird im Weiteren nur noch von einer Netto-THG-Neutralität gesprochen.
- (3) Ein Gebäude wird dann als netto-treibhausgasneutral betrachtet, wenn *alle* Module des Lebenszyklus gemäß DIN EN 15804:2022-03, DIN EN 15643:2021-12, DIN EN 15978:2012-10 die Anforderungen an eine THG-Neutralität erfüllen. Das heißt, dass eine Netto-THG-Neutralität in Betrieb und Nutzung (Module 6.1, 6.2, 6.3) sowie unter Berücksichtigung aller grauen Emissionen gemäß QNG (Module A1-3), Austausch (B4) und End of Life (Modul C3-4) rechnerisch nachgewiesen wurde, alle weiteren Module (B1-3, B5, B7 und B8) rechnerisch oder/und pauschal nachgewiesen wurden sowie Möglichkeiten bezüglich Wiederverwendung und Recycling (D1) informativ ausgewiesen werden. Am Gebäude und auf der Liegenschaft erzeugte Energie (erneuerbar) zur Deckung des Eigenbedarfs und zur Lieferung an Dritte wird in Modul D2 informativ ausgewiesen. Energie zur Deckung des Eigenbedarfs wird gemäß QNG mit Modul B6.1 verrechnet.⁹ Restliche THG-Emissionen sind durch das Beziehen von Strom aus erneuerbaren Energiequellen (Ökostrom gemäß UBA-Definition) zu minimieren. Die Auswahl zugelassener Kompensationsmaßnahmen ist noch zu definieren.
- (4) Aufgrund fehlender Daten (nicht mandatierte Module) ist diese Definition aktuell nur mit hohem Aufwand und großen Unsicherheiten umzusetzen, sodass eine Orientierung an der momentan umsetzbaren QNG-Definition hinsichtlich der lebenszyklusbezogenen Systemgrenze praktikabel erscheint. Datengrundlagen und vereinfachte Nachweisverfahren für die

9 Anreize für eine Überproduktion an erneuerbarer Energie am Gebäude und auf der Liegenschaft könnten durch Quartiersbilanzierung entstehen: Durch einen Quartiersansatz könnte somit am Gebäude oder auf der Liegenschaft produzierte Energie (erneuerbar), welche an Dritte innerhalb des Quartiers geliefert wird, mit B6.1 verrechnet werden und wäre somit innerhalb der Systemgrenze.

untenstehenden Module sind zu entwickeln. Als erster Ansatz wird vorgeschlagen, folgende Datengrundlagen in naher Zukunft bereitzustellen:

- Modul A4: bereits über eLCA angelegt und könnte über die kategorischen Faktoren »Entfernung« und »Bauzeit« mit pauschalen Kennwerten beziffert werden;
- Modul A5: durchschnittliche Kennwerte pro m² NRF je Nutzungs- und Gebäudetypologie sowie Gebäudeklasse können aus abgerechneten Projekten generiert werden;
- Modul B1: rechnerischer Nachweis der Emissionen aus Betriebsmitteln, beispielsweise Schmierstoffe, Hydraulikflüssigkeiten und Kältemittel (F-Gase);
- Modul B2: durchschnittliche Kennwerte pro m² NRF;
- Modul B3: prozentualer Abschlag für ausgewählte Bauweisen und Bauteile bezogen auf die Herstellung (A1-3);
- Modul B5: prozentualer Abschlag für ausgewählte Bauweisen und Bauteile bezogen auf die Herstellung (A1-3);
- Modul B6.1: Verwendung zeitlich-dynamischer Datensätze (beispielsweise für Fernwärme, Strom-Mix etc.) mindestens alle fünf Jahre, wenn möglich in kürzeren Abständen;
- Modul B6.2: rechnerischer Nachweis gemäß QNG;
- Modul B6.3: rechnerischer Nachweis gemäß QNG;
- Modul B7: Frischwasserverbrauch in Liter pro Nutzer, Abwasseraufkommen inkl. abgeführtem Regenwasser, gegebenenfalls zusätzlich Umrechnung anfallendes GWP für externe Abwasseraufbereitung als informativer Zusatz; der produktbezogene Frischwasserverbrauch ist in den Modulen A1-3 auszuweisen, der baustellenbezogene Frischwasserverbrauch ist in Modul A5 auszuweisen;
- Modul B8: sollte zum aktuellen Zeitpunkt nicht betrachtet werden; Anreize zur E-Mobilität sollten gegeben werden, sind jedoch nicht primär im Handlungsfeld Gebäude angesiedelt;
- Modul C1: durchschnittliche Kennwerte pro m² NRF je Nutzungs- und Gebäudetypologie sowie Gebäudeklasse können aus abgerechneten Projekten generiert werden;
- Modul C2: über Baumasse m₃, Materialkategorie und Entfernungskategorien mit durchschnittlichen Kennwerten beziffern;

- Modul D1: als informativer Zusatz¹⁰, politische Anreize und Steuerungsinstrumente sind zu entwickeln¹¹; Mechanismen zur Absicherung der Umsetzung am Ende des Lebenszyklus müssen verbindlich geschaffen werden;
 - Modul D2: als informativer Zusatz, politische Anreize und Steuerungsinstrumente sind zu entwickeln;¹² Quartiersansätze sind zu fördern.
- (5) Die Beschreibung des Gebäudes orientiert sich an den Kostengruppen der DIN 276. KG 200 (Herrichten und Erschließung) ist aktuell nicht einbezogen und bewertet. Entsprechende Datensätze für die KG 200 sollten künftig ergänzt werden.¹³ KG 300 (Baukonstruktion) und KG 400 (Technische Anlagen) sollten vollständig abgebildet werden. Kleinkomponenten KG 400 sollten pauschal über einen Sockelbetrag abgebildet werden. KG 500 (Außenanlagen) sollten wie aktuell im QNG sinngemäß abgebildet werden, sofern sie der Gebäudeversorgung dienen. Mindestens ist ein Ansatz mit durchschnittlichen Kennwerten, besser Datensätze für Materialien und Prozesse im Außenraum zu erstellen.
- (6) Die Weiter- und Wiederverwendung vorhandener Ressourcen auf der Liegenschaft und vorhandener Bausubstanz zur Förderung des Kreislaufge-

-
- 10 Modul D1 befindet sich gemäß QNG und Norm weiterhin außerhalb der Systemgrenze, da der selektive Rückbau und die Weiter- oder Wiederverwendung von einzelnen Baustoffen am Ende des Lebenszyklus aktuell und außerhalb einer Absichtserklärung noch nicht sichergestellt werden können bei Errichtung des Gebäudes. Anrechnung und Verortung aufgrund chemischer Reaktionen von Baustoffen bei Produktherstellung und während des Lebenszyklus sind zu diskutieren und gegebenenfalls informativ auszuweisen.
- 11 Beispielsweise durch Verankerung des in Modul D1 ausgewiesenen Potenzials im Rahmen von Förderprogrammen zum selektiven Rückbau.
- 12 Beispielsweise durch Quartiersansätze oder durch Verbindung des in Modul D2 ausgewiesenen Potenzials zum Export von Energie (erneuerbar) an Dritte im Rahmen des Emissionshandels.
- 13 Die Wiederverwendung des Baugrubenaushubs sollte in die Bilanz einfließen beziehungsweise somit gefördert werden. Beispielsweise fällt Lehm unter anderem beim Baugrubenaushub in Neubaugebieten oder bei Kanal- oder Straßenbauarbeiten an. Wiederverwendete Materialien im Rahmen der zu bebauenden Liegenschaft oder benachbart sollten, wenn möglich und unbedenklich, im Rahmen einer Bilanz bewertet werden, um Wiederverwendung zu fördern und neue Ressourceninanspruchnahme zu vermeiden.

rechten Bauens wird als neutrale Position innerhalb von Modul A aufgegriffen.¹⁴

- (7) Der Nachweis einer Treibhausneutralität gemäß BBSR-Definition sollte nicht nur für ein einzelnes Bauwerk, sondern für alle Gebäude und die gesamte Liegenschaft gelten, um unterschiedliche Gebäudeperformances ausgleichen zu können. Auch bei unterschiedlichen Eigentumsstrukturen und gemischt genutzten Quartieren sollte der Nachweis der »Klimaneutralität« auf Quartiersebene ausgeweitet werden können. Hier könnten Ansätze für eine neue Fördersystematik liegen.
- (8) Von der alleinigen Verwendung der NRF als Bezugsgröße wird abgeraten. Es sind Typologie bezogene Benchmarks inklusive einer Abbildung pro Kopf beziehungsweise pro Nutzungsstunde zu entwickeln, um positive Effekte einer Nutzungsüberlagerung und dergleichen abbilden zu können.
- (9) Für das Lebenszyklusmodell bleibt zunächst die Konvention des Betrachtungszeitraums der ersten 50 Jahren erhalten.¹⁵
- (10) Abschneidekriterien könnten ersetzt werden durch Vorgaben der verpflichtend zu erfassenden Bauteile und zur Detailtiefe. Ein prozentualer Aufschlag für nicht zu erfassende Bauteile sollte aufgrund von bauweise-typischen Kennwerten erfolgen, um das Verfahren zu vereinfachen.
- (11) Eine alleinige Reduktion auf das Nachweisen von THG-Emissionen greift zu kurz und vernachlässigt das Betrachten weiterer globaler Umweltwirkungen, die Effekte wie beispielsweise Smog und »sauren Regen« verursachen. THG adressiert demnach ausschließlich die planetare Grenze »Klimawandel«. Neben den bereits normativ geforderten Kernindikatoren und zusätzlichen Umweltwirkindikatoren der DIN EN 15804:2022-03, wird empfohlen, Ressourcen-bezogene Indikatoren zu folgenden Wirkungsbereichen nach- oder und auszuweisen: Ressourceneinsatz (Energie), Ressourceneinsatz (Frischwasser/Süßwasser) und Ressourceneinsatz (Rohstoffe) mit globaler Dimension. Um Transparenz und einen einheitlichen Informationsfluss gemäß DIN EN 15643:2021-12 sicherzustellen, müssen die auf der Produktebene verwendeten Indikatoren auch für die Bewertung auf der Ebene des Bauwerks gelten. Außerdem sind Indikatoren für weitere bekannte Wechselwirkungen, wie zum Beispiel

14 Die Module C und D sind weiterhin zu modellieren.

15 Hierbei handelt es sich um eine politische Konvention, welche erneut diskutiert werden könnte.

radioaktiver Abfall (RWD) oder biogener Kohlenstoffgehalt (Biog. C) sowie Indikatoren für lokale Umwelt- und Klimawirkpotenziale insbesondere für die Bereiche Boden, Flächeninanspruchnahme und Biodiversität zu definieren.

Damit ergäbe sich für den Teilaspekt der Netto-THG-Neutralität folgende normkonforme grafische Zuordnung:

Abbildung 41: Vergleich der in die ökobilanzielle Betrachtung eingeschlossenen Module im Lebenszyklus eines Gebäudes bei unterschiedlichen Rechen- und Bilanzierungsregeln sowie Ergänzung um einen Vorschlag für eine möglichst umfassende und praktikable Definition von Netto-THG-Neutralität im Handlungsfeld Gebäude (BBSR, eigene Darstellung nach DIN EN 15804:2022-03, DIN EN 15643:2021-12; DIN EN 15978:2012-10 sowie Ramseier/Frischknecht 2020: 1)

LEBENSZYKLUS VON BAUWERKEN																INFORMATIONEN außerhalb des Lebenszyklus					
A0	A1-A3			A4-A5		B1-B8								C1-C4				D			
Planung	Herstellung			Errichtung		Nutzung und Betrieb								Entsorgung				Vorteile u. Entlastungen außerhalb der System- grenze (Zusatzangabe)			
A0	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6.1	B6	B6.2	B7	B8	C1	C2	C3	C4	D1	D2
Nicht physische Prozesse vor der Errichtung, Vortrassen, Prüfung, Erwerb von Bauland, Planung	Materialversorgung	Transport	Herstellung	Transport	Errichtung und Baustelle	Nutzung, inst. Produkte	Instandhaltung	Instandsetzung	Austausch	Modernisierung	Energie-Betrieb, geregelt	Energie-Betrieb, nicht gereg.	Nutzenstrom	Wassereinsatz im Betrieb	Nutzeraktivitäten	Rückbau	Transport	Abfallaufber. f. Wiederverw. Recycling u. Energierückgew.	Entsorgung	Neuflüsse aus Wiederverwend. Recycling, Energierückgewinnung u. anderen Verwertungsverfahren	Abgeflachte Versorgungsmetho- den (z. B. elektrische Energie, thermische Energie, Trinkwasser)
gem. DIN 15804, DIN EN 15643, DIN EN 15978																					
DEF 1 THG-n im Betrieb	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
DEF 2 THG-n in Betrieb & Nutzung*	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	k	k	x	x	x	x	x	x	x
DEF 3 THG-n in LZ limitiert	x	x	x	x	x	v	x	x	x	x	x	x	k	k	x	x	x	x	x	(x)	(x)
DEF 4 THG-n in LZ gesamt	x	x	x	x	(a)	(a)	(a)	(a)	x	(a)	x	k	k	(a)	(a)	(a)	(a)	x	x	(x)	(x)
THG-n praktikabel																					
x x x x x/k k x k k x k k x x k x x k x x x x (x) (x)																					
A1	gebäudebedingt, nicht geregelt																				
B6	betriebsbedingt																				
B6.1	betriebsbedingt, geregelt in GEG																				
B6.2	betriebs- und nutzungsbedingt, geregelt in QNG/BEG																				
x absolut berechnet (x) zusätzlich ausgewiesen k durchschnittl. Kennwert v Verbot klimaschädlicher Kühlmittel (a) Annahme aufgrund fehlender Daten * Sockelbetrag TGA																					

(12) »Klima- und ressourcenschonendes Bauen« muss sich mindestens am Lebenszyklus von Gebäuden, an den planetaren Grenzen und einem entsprechenden Indikatoren-Set orientieren. Zum besseren Einordnen von klima- und ressourcenschonendem Bauen könnte auf Grundlage der DIN EN 15643:2021-12 und der ISO 14068–1:2023 eine Anpassung durch Kopplung der Lebenszyklusbetrachtung mit Umwelt- und Klimawirkpotenzialen einschließlich ihrer Zuordnung zu planetaren Grenzen diskutiert werden.

Eine überarbeitete Systematik könnte wie folgt aussehen:

Abbildung 42: Skizze zur Verdeutlichung der Zusammenhänge zwischen Umwelt- und Klimawirkpotenzialen (anhand eines ausgewählten Indikatoren-Sets), deren Anfall und Größenordnung innerhalb des Lebenszyklus eines Gebäudes (Module A–D sowie in Summe) und deren Zuordnung zu den planetaren Grenzen (Bezug zu nationalen Budgets) (BBSR, eigene Darstellung)



Eine detaillierte inhaltliche Befüllung der Zuordnung könnte wie folgt aussehen:

Abbildung 43: Exemplarisch befüllter Vorschlag zur Verdeutlichung der Zusammenhänge zwischen Umwelt- und Klimawirkpotenzialen (anhand GWP 100 und FW), deren Anfall und Größenordnung innerhalb des Lebenszyklus eines Gebäudes (Module A–D sowie in Summe) sowie deren Zuordnung zu den planetaren Grenzen (Bezug zu nationalen Budgets) (BBSR, eigene Darstellung)

