

A Allgemeines und Normung

**A 1 Nachhaltigkeit und Klimaschutz im Hochbau –
vom Energieverbrauch in der Nutzung
zur Lebenszyklusanalyse**

Özlem Özdemir, Carina Hartmann, Karina Krause
und Annette Hafner

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung – jetzt handeln 3	4	Beispielhafte Bewertung im Wohnungsbau 12
1.1	Hintergrund 3	4.1	Rahmenbedingungen 12
1.2	Klimaschutz und Ressourcenschonung 3	4.1.1	Lebenszyklusanalyse von Gebäuden 12
2	Nachhaltigkeitsbewertung im Hochbau 4	4.1.2	Gebäuderahmenbedingungen 12
2.1	Begriffsdefinition und Entwicklung des Begriffs 4	4.1.3	Umweltindikatoren 13
2.2	Nachhaltigkeitszertifizierung 5	4.2	Gebäudeübersicht 13
2.2.1	Zertifizierungssysteme der ersten Generation „Green Buildings“ 6	4.3	Einbezug von Nutzerstrom und Einbezug/Bewertung der Photovoltaikanlage 13
2.2.2	BREEAM 6	4.4	Sonderthema „Gebäude mit Kellergeschoss“ 14
2.2.3	LEED 6	4.4.1	Repräsentative Gebäude 14
2.3	Zertifizierungssysteme der zweiten Generation DGNB, NaWoh, BNB, BNK 6	5	Ergebnisse 14
2.3.1	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) 6	5.1	LCA-Ergebnisse GWP 14
2.3.2	Bewertungssystem Nachhaltigen Bauens (BNB) 7	5.2	LCA-Ergebnisse PENRT 16
2.3.3	Nachhaltiger Wohnungsbau (NaWoh) 7	5.3	Sensitivitätsanalyse zum Energieverbrauch im Betrieb einschließlich Modul B6.3 17
2.3.4	Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau (BNK) 7	5.4	Ergebnisse Sonderthema „Gebäude mit Kellergeschoss“ 18
3	Klimaschutzaspekte in der Nachhaltigkeitsbewertung 8	5.4.1	LCA-Ergebnisse GWP 18
3.1	Bewertung der ökologischen Qualität im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung 8	5.4.2	Vergleich der Ergebnisse zukunftsorientiertes/konventionelles Gebäude 18
3.1.1	Energie 8	5.4.3	Vergleich der Ergebnisse BGF/NRF 18
3.1.2	Emissionen 8	5.4.4	Vergleich mit/ohne Keller 19
3.1.3	Schadstoffe 8	5.4.5	Schlussfolgerung 20
3.1.4	Flächeneinsparung/Flächenversiegelung 9	6	Diskussion und Schlussfolgerung 20
3.1.5	Wasser 9	Fazit 21	
3.1.6	Nachwachsende Rohstoffe 10	Literatur 21	
3.2	Kernthema Lebenszyklusbetrachtung (LCA) 10		
3.2.1	LCA Normung 10		
3.2.2	Lebenszyklusphasen 10		
3.3	Aktuelle Trends 11		
3.3.1	Nachhaltigkeitsbewertung (QNG) 11		
3.3.2	Umsetzung im GEG 11		

1 Einführung – jetzt handeln

1.1 Hintergrund

Nicht erst seit dem Übereinkommen von Paris (ÜvP) [1] kommt dem Bausektor eine zentrale Bedeutung bei der Erreichung von Klimaschutzz Zielen zu. Die Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDG – sustainable development goals) oder verschiedene auf europäischer Ebene angesiedelten Initiativen wie der europäische Grüne Deal (green deal) [2] und die Renovierungswelle (renovation wave) [3] für Bestandsgebäude sowie die EU-Taxonomie [4] nehmen bewusst den Gebäudebereich in den Fokus – denn der Bausektor spielt durch seinen großen Ressourcen- und Energieverbrauch eine wichtige Rolle zur Erreichung der Klimaschutzziele in Deutschland. Das erklärte Ziel bis zum Jahr 2045 die Treibhausgasemissionen so weit zu mindern, dass im Bausektor ein treibhausgasneutraler Gebäudebestand erreicht wird, ist durch das Urteil des Bundesverfassungsgerichts zum Klimaschutzgesetz [5] zentral in das Bewusstsein gerückt. Am 24. März 2021 hat das Bundesverfassungsgericht das Klimaschutzgesetz der Bundesregierung als unzureichend eingestuft und Verschärfungen gefordert. Die Anforderungen und die Umsetzung stellen die Akteure im Baubereich aktuell vor große Herausforderungen, denn die bisherigen Schritte reichen bei Weitem nicht aus.

Dieser Beitrag stellt hierzu die zentralen Vorgaben der Nachhaltigkeit im Baubereich dar und fokussiert dabei auf die zentralen Felder des Klimaschutzes und der Ressourceneffizienz. Es wird dargestellt, wie die Nachhaltigkeitsbewertung für den Hochbau operationalisiert wird. Gleichzeitig werden aktuelle Umsetzungsmöglichkeiten vorgestellt.

1.2 Klimaschutz und Ressourcenschonung

Angesichts der Erderwärmung und der ambitionierten Klimaziele der Europäischen Union steht die Bauindustrie vor einschneidenden Umbrüchen. Immer knapper werdende Rohstoffe und steigende Treibhausgasemissionen führen dazu, dass ein schnelles Umdenken erforderlich ist, um die festgesetzten Klimaschutzziele erreichen zu können. Der Gebäudesektor spielt in Deutschland mit insgesamt 40 % der CO₂-Emissionen sektorenübergreifend eine zentrale Rolle bei der Senkung der Treibhausgase [6].

Hierzu ist es erforderlich, neben einem sehr hohen energetischen Standard und der Energiegewinnung an den Gebäuden, auch den gesamten Lebenszyklus der Gebäude mit in den Fokus zu nehmen. Um die Vorgaben im Klimaschutzgesetz bis 2045 erreichen zu können, ist der Gebäudesektor einer der wichtigsten Bestandteile, da dieser für mehr als ein Drittel der direkten und indirekten Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Die Anforderungen an Klimaschutz, Ressourcenschonung, Energieeffizienz und zirkuläres Wirtschaften müssen vor dem Hintergrund der gesellschaft-

lichen Transformationsprozesse hier verstärkt umgesetzt werden. Nachdem die Treibhausgasreduktionen in der Nutzungsphase von Gebäuden für den Neubau in den letzten Jahren schon deutlich reduziert werden konnten (GEG-Anforderungen), finden sich weitere Verbesserungsmöglichkeiten vor allem in der Konstruktionswahl. Aber auch der Gebäudebestand, seine energetische Verbesserung und die Modernisierungen sowie die Nachverdichtung sind in der Wichtigkeit nicht zu unterschätzen.

Aufgrund der langjährigen Nutzungsdauer der Gebäude, stellen sich die bis 2045 zu erreichenden Effekte nur langsam ein. Anpassungen und geänderte Planungsvorgaben müssen deshalb ab sofort in die Planungsprozesse eingespeist werden, um „Locked-in-Effekte“ vermeiden zu können.

Die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden stellt eine inzwischen eingeführte Möglichkeit dar, die Gebäude ganzheitlich zu betrachten. Allerdings sollte diese Bewertung im Sinne der Erfüllung von Klimaschutz und Ressourcenschonung so angepasst werden, dass Klimaschutz, Ressourcenschonung und ökologische Fragestellungen die Grundlage bilden, auf der dann die gesamte Gestaltung und Umsetzung des Gebäudes aufbaut, – anstelle nur ein kleiner Teil der Bewertung zu sein. Hierbei ist das Thema Lebenszyklusbetrachtung von großer Relevanz. Auch muss vorab erläutert werden, welche Ressourcen im Gebäudesektor geschont und effizient eingesetzt werden müssen.

Lebenszyklusbetrachtung

Mit der Lebenszyklusbetrachtung gibt es eine quantifizierbare Methode, wie die Umweltbelastungen und Ressourcen des Gebäudes über seinen gesamten Lebenszyklus betrachtet werden können. Dabei kann eine Optimierung der Energieverbräuche in der Nutzungsphase und gleichzeitig eine Optimierung der Konstruktion unter Berücksichtigung der Erstellung der Bauwerke, der Instandhaltung und des Rückbaus dargestellt und nachvollziehbar umgesetzt werden. Damit müssen zugleich auch Themen der Kreislaufwirtschaft, des Rückbaus und der Wiederverwendung von Bauteilen und Bauprodukten in den Fokus rücken.

Was sind die Ressourcen, die im Gebäudebereich gemeint sind?

Die Ressourcen lassen sich in vier Kategorien ordnen. Diese sind die Fläche, die Energie, das Material und die blau-grüne Infrastruktur [7]. Die Fläche, auf der ein Neubau erstellt wird, ist damit versiegelt und der Boden kann damit nicht zu anderen Funktionen beitragen – der Beitrag der Gebäude zur Flächenversiegelung beträgt aktuell 54 ha pro Tag [8]. Die Ressource Energie ist für das Gebäude in verschiedener Hinsicht sehr relevant. Zum einen soll das Gebäude möglichst wenig Energie in seiner Nutzungsphase verbrauchen und zugleich möglichst viel Energie aus erneuerbaren Quellen am Gebäude erzeugen. Energie steckt aber auch in den Materialien. Die Materialien, aus denen ein Gebäude-

de entsteht, sollten so ausgewählt sein, dass sie möglichst wenig Energie bei ihrer Herstellung verbrauchen und wenn möglich das Gebäude zu einem Kohlenstoffspeicher machen. Die Wahl der Konstruktionsweise und der Materialien ist eine der großen Stellschrauben, auf die die Planung einen entscheidenden Einfluss hat. Sind andere Faktoren wie die Standortwahl, das Raumprogramm oder die Dichte oftmals schon entschieden, so besteht bei der Entscheidung der Konstruktionsweise Handlungsspielraum.

2 Nachhaltigkeitsbewertung im Hochbau

2.1 Begriffsdefinition und Entwicklung des Begriffs

Die Idee der Nachhaltigkeit geht auf die Forstwirtschaft, genauer auf *Hanns Carl von Carlowitz*, im 18. Jahrhundert zurück. Nachhaltigkeit wurde in diesem Kontext als eine Bewirtschaftungsweise der Wälder definiert, bei der immer nur so viel Holz entnommen wird, wie auch nachwachsen kann. Das übergeordnete Ziel dabei war und ist es, die Regenerationsfähigkeit des Systems Wald zu erhalten.

In dem 1987 veröffentlichten „Brundtland Bericht“ wurde der Begriff Nachhaltigkeit aufgenommen und in einem umfassenden Zusammenhang gesetzt. Der sogenannte Brundtland Bericht war der Abschlussbericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (WCED) unter Vorsitz von *Gro Harlem Brundtland*. Nachhaltigkeit wird darin erstmals als eine beständige Entwicklung verstanden und wie folgt definiert: „... sustainable development meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.“ [9] Nachhaltigkeit wird seitdem als eine Entwicklung definiert, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen. Damit wird der Nachhaltigkeit von den Vereinten Nationen eine entscheidende Bedeutung zugeordnet und mit der begrenzten Belastbarkeit unserer Erde in Zusammenhang gesetzt.

In den folgenden Klimakonferenzen wurde die Umweltpolitik als Regierungsthema anerkannt und sich Ziele hinsichtlich Klimawandel, Wasserqualität/-mangel, Artensterben, Endlichkeit der Ressourcen usw. gesetzt. Verbindliche Grenzwerte sowie einen Zeithorizont und Maßnahmen wurden auf der Klimakonferenz in Kyoto (1997) beschlossen. Im sogenannten Kyoto-Protokoll haben sich die Industrieländer vergleichsweise zu einer geringen Reduktion ihres Ausstoßes an Treibhausgasen verpflichtet. 2015 wurde in Paris als Nachfolgevertrag für das Kyoto-Protokoll ein neues Abkommen mit verbindlichen Klimazielen für alle 195 Mitgliedsstaaten der UN-Klimarahmenkonvention vereinbart. Die Erderwärmung soll auf weniger als



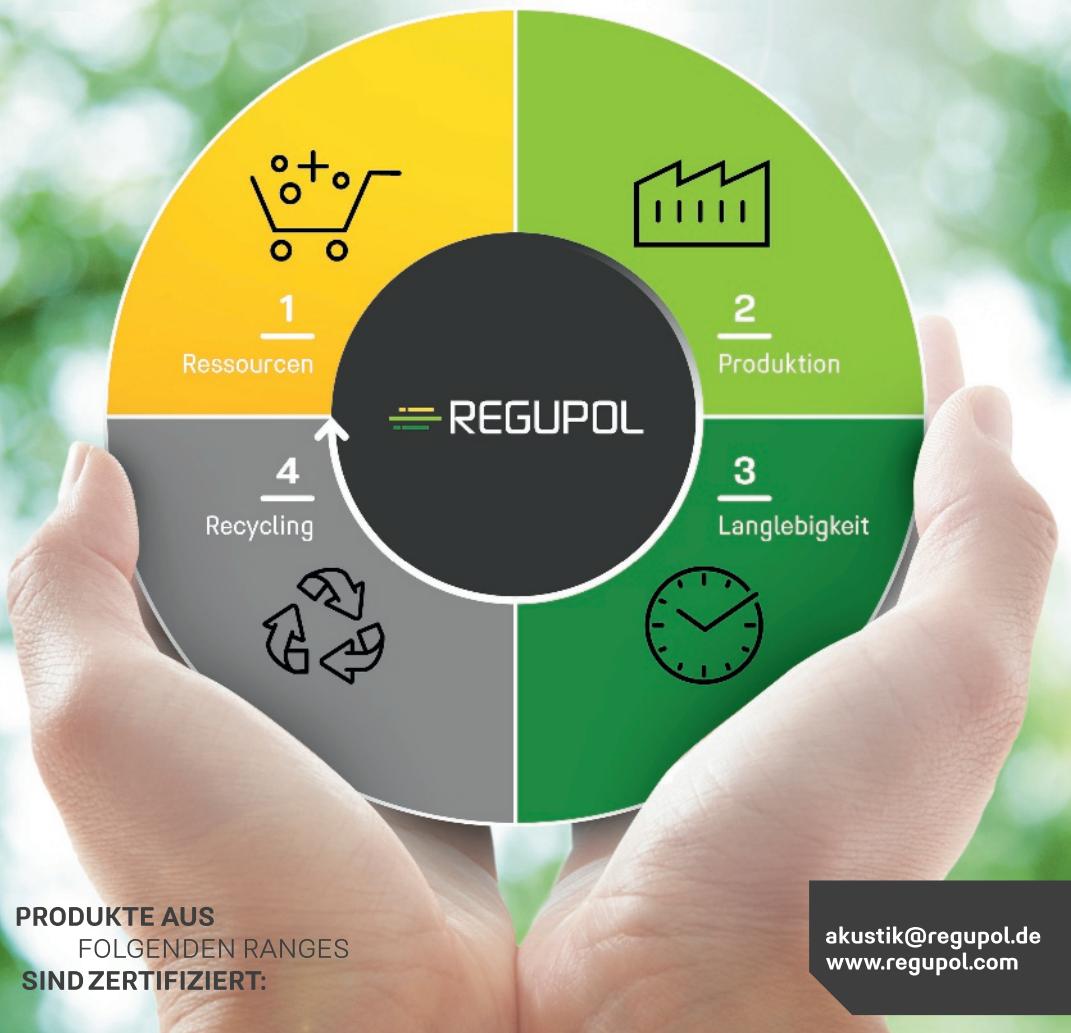
Bild 1. Nachhaltigkeitsdreieck (eigene Darstellung)

2 °C begrenzt sowie die globalen Netto-Treibhausgasemissionen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts auf null reduziert werden. In den folgenden Klimakonferenzen gab es nur geringe Weiterentwicklungen der Klimaschutzziele. Es wurden überwiegend Minimalkompromisse geschlossen. Dementsprechend standen die Klimakonferenzen zunehmend in der Kritik. Auf der letzten Klimakonferenz in Glasgow (2021) wurde das 1,5-Grad-Ziel bestätigt und die Staaten aufgefordert, ihre Klimaziele für 2030 bis Ende kommenden Jahres nachzubessern. Weiterhin wird in dem Glasgower Beschluss gefordert, die Treibhausgasemissionen bis 2030 global um 45 Prozent im Vergleich zu 2010 zu reduzieren. Die Europäische Union hat beschlossen, sich strengere Klimaschutzziele zu setzen und diese gesetzlich zu verankern. 2045 will Deutschland klimaneutral werden und bis 2030 den Treibhausgasausstoß um mindestens 65 Prozent senken. Dazu muss der gesamte Themenkomplex der globalen (politischen und gesellschaftlichen) Ziele und Strategien heruntergebrochen werden bis hin zu der lokalen Umsetzung von Teilzielen in einzelnen Gemeinden [10].

Dabei wird immer betont, dass es sich dabei um eine „nachhaltige Entwicklung“ (sustainable development) handeln muss. Die Definition der Nachhaltigkeit bzw. der nachhaltigen Entwicklung wurden auch in Deutschland weiterentwickelt: Die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages (1998) integrierte die drei Säulen Ökologie, Ökonomie und Soziales und legte damit die Grundlage dafür, dass das „Nachhaltigkeitsdreieck“ (Bild 1) das bekannteste Modell im Nachhaltigkeitsdiskurs wurde. Die drei Dimensionen werden dabei gleichberechtigt und gleichwertig behandelt. Die einzelnen Dimensionen greifen ineinander und bedingen sich gegenseitig. Die ökologische Dimension beschreibt die Zieldimension, Natur und Umwelt für die nachfolgenden Generationen zu erhalten sowie Klimaschutz, Artenvielfalt, Pflege und Erhalt von Landschafts- und Kulturräumen sowie den schonenden Umgang mit Ressourcen. Die ökonomische Nachhaltigkeit beinhaltet den Schutz wirtschaftlicher Ressourcen. Ziel ist die Bildung einer Wirtschaftsweise, die eine dauerhafte und tragfähige Grundlage für Erwerb

CRADLE TO CRADLE CERTIFIED®

PRODUKTE DER ACOUSTICS DIVISION



REGUPOL
sound



REGUPOL
sound and drain



REGUPOL
comfort



REGUPOL
vibration



Cradle to Cradle Certified® ist eine eingetragene Marke des Cradle to Cradle Product Innovation Institute (C2CPII).

 **REGUPOL**

Bernhard Weller, Silke Tasche (Hrsg.)

Glasbau 2023

- umfasst alle wesentlichen aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet des konstruktiven Glasbaus und der Fassadentechnik
- enthält aktuelle Beispiele ausgeführter Bauwerke
- Autor:innen sind führend in Forschung und Praxis

Der konstruktive Glasbau ist einer der dynamischsten Bereiche des Ingenieurbaus. Namhafte Autorinnen und Autoren berichten über Forschungsergebnisse und aktuelle Bauprojekte. Neben Fragestellungen zum Werkstoff Glas als Teil der Tragstruktur stehen energieeffiziente Gebäudehüllen im Fokus.



Glasbau 2023

Bauten und Projekte
Bemessung und Konstruktion
Forschung und Entwicklung
Bauprodukte und Bauarten

vorl. Abb.

 Ernst & Sohn



4/2023 · ca. 400 Seiten ·
ca. 284 Abbildungen · ca. 33 Tabellen

Softcover

ISBN 978-3-433-03390-6

ca. € 49.90*

Bereits vorbestellbar.

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3390

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.

und Wohlstand bietet. Ziel der sozialen Dimension ist eine auf Dauer zukunftsfähige und lebenswerte Gesellschaft zu erreichen.

Nachhaltigkeit ist als Grundprinzip für das Handeln in allen Bereichen des Lebens anwendbar. Nachhaltigkeit ist auch auf allen Ebenen von global bis regional denkbar. Bei der ökologischen Dimension wird in großen Teilen ein globaler Ansatz gewählt (Kyoto-Protokoll, Klimakonferenzen), während bei der wirtschaftlichen und vor allem sozialen Perspektive meistens lokale bis nationale Blickwinkel betrachtet werden.

Das Nachhaltigkeitsdreieck wird auch als Drei-Säulen-Modell dargestellt. Bei dieser Denkweise ist Nachhaltigkeit auf den Säulen Ökologie, Ökonomie und Soziales aufgebaut. In neueren Veröffentlichungen wird das Nachhaltigkeitsdreieck durch eine vierte Dimension, die kulturelle Diversität, ergänzt. Diese wird als unersetzbare für die kulturelle Identität der Gesellschaft angesehen, wobei es nicht nur um Denkmäler geht, sondern auch „... , um die gebaute Umwelt als Produkt der menschlichen Geschichte. Sie stellt als architektonisches Erbe eine nichterneuerbare Ressource dar.“ [11]

Allen Definitionen ist das Ziel gemeinsam, die Erhaltung der Lebensgrundlage, Chancengleichheit über Generationen und Sicherung der Bedürfnisse der Menschen über Generationen zu gewährleisten.

In diesem Beitrag wird auf die Betrachtungsweise des Nachhaltigkeitsdreiecks zurückgegriffen. Die hier betrachtete Systemgrenze ist die Ebene des Gebäudes, dabei werden Kriterien betrachtet, die unmittelbar mit dem Gebäude, der Erstellung des Gebäudes und seiner Nutzung zusammenhängen.

In Deutschland wurde 2001 von der deutschen Bundesregierung der „Rat für nachhaltige Entwicklung“ eingesetzt. Der Rat hat die Aufgabe, kritisch zu den aktuellen Fragen im Bereich der Nachhaltigkeit (von Klima- und Energiepolitik bis Generationenthemen) Stellung zu nehmen. Ziel war es, Beiträge für die Umsetzung der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie zu entwickeln, konkrete Handlungsfelder und Projekte zu benennen sowie Nachhaltigkeit zu einem wichtigen öffentlichen Anliegen zu machen.

2002 veröffentlichte die Bundesregierung eine Nachhaltigkeitsstrategie, bei der der „Rat für nachhaltige Entwicklungen“ Anregungen und Empfehlungen gab. Mit der Strategie sollen nachhaltige Entwicklungen vorangetrieben werden. Seit 2016 orientiert sich die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie an den 17 SDGs. Damit wurden die Ziele der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie internationaler ausgerichtet, um auch die internationalen Einflüsse von Deutschland durch Maßnahmen mit aufzunehmen.

Im Bereich der Kreislaufwirtschaft ist das übergeordnete Ziel, das Wachstum vom Ressourcenverbrauch zu entkoppeln sowie Konsum und Produktion mit den planetaren Grenzen in Einklang zu bringen. Der Baubereich kann durch eine verbesserte Effizienz der Ressourcennutzung einen entscheidenden Beitrag leisten. Aufgabe der Politik ist dabei, durch Anreize den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen in den Mittelpunkt

zu stellen. Daraus folgt der zweite Themenbereich der Nachhaltigkeitsstrategie, in dem das nachhaltige Bauen explizit benannt wird. Das Bauwesen zeigt Synergie-Effekte zu mehreren Bereichen der Nachhaltigkeitsstrategie bzw. der Nachhaltigkeit im Allgemeinen durch die komplexen vor- und nachgelagerten Prozesse. Dementsprechend ergeben sich beim nachhaltigen Bauen umfassende Anforderungen an die Energieeffizienz und Klimaneutralität, Erhalt der Biodiversität, Ressourcenschonung und Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen, Reduzierung des Flächenverbrauchs, nachhaltige Beschaffung von Produkten und Dienstleistungen einschließlich der Einhaltung von Menschenrechten in der Lieferkette sowie Sicherung von Gesundheit und Komfort von Nutzern [12].

2.2 Nachhaltigkeitszertifizierung

In den USA, Australien, Russland, Kanada und Spanien wurde 1990 mit der Gründung von Gremien für grünes Bauen (Green Building Councils) begonnen. Diese hatten zum Ziel, die Auswirkungen von Gebäuden auf die Umwelt erfassbar und bewertbar zu machen. 2008 ist Deutschland mit der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) der 2002 gegründeten Dachorganisation World Green Building Council (WGBC) beigetreten [13]. Aktuell umfasst die Organisation 70 Green Building Councils auf der ganzen Welt, die mit dem Ziel zusammenkommen, den Bausektor in den Bereichen Klimaschutz, Gesundheit, Wohlbefinden sowie Ressourcen und Zirkularität durch nachhaltiges Bauen zu verändern. Aus der Organisation und den Gremien und deren Vorhaben haben sich im Laufe der Zeit Nachhaltigkeitszertifizierungen entwickelt. Die Nachhaltigkeitszertifizierungen sollen die Nachhaltigkeit des Bauwerks vergleichbar und transparent darstellen. Die ersten Zertifizierungssysteme waren vorwiegend auf ein bestimmtes Land zugeschnitten, haben sich aber gleichzeitig stetig weiterentwickelt. Inzwischen wurden einige an andere Märkte angepasst, wodurch sie international an Bedeutung gewonnen haben.

Die Nachhaltigkeitszertifizierungen unterscheiden sich hinsichtlich der Anwendungsfälle sowie der Bewertung der Nachhaltigkeit. Die Systemvarianten können grundsätzlich in die Nachhaltigkeitszertifizierungen, in denen gleichwertig nach ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimensionen bewertet wird und den Green Building Zertifikaten, in denen hauptsächlich die ökologische Dimension bewertet wird, unterschieden werden. Weiterhin wird zwischen den Systemen erster Generation (Green Building Zertifikat) und den Systemen zweiter Generation (der Nachhaltigkeitszertifikate), unterschieden. Ein gemeinsamer zentraler Aspekt der Nachhaltigkeitszertifikate ist immer die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus. Die Betrachtung des Lebenszyklus eines Gebäudes umfasst immer die Phasen Herstellung, Nutzung und Rückbau/Entsorgung.

2.2.1 Zertifizierungssysteme der ersten Generation „Green Buildings“

Bei den Green Building Zertifizierungssystemen wird der Fokus besonders auf die ökologischen Auswirkungen von Gebäuden gelegt. Nachfolgend werden die zwei bekanntesten Systeme BREEAM und LEED, die auch in Deutschland zur Anwendung kommen, beschrieben. Darüber hinaus gibt es weitere Systeme, die zu den Green Building Systemen zählen, aber in Deutschland nur eine untergeordnete Rolle spielen wie beispielsweise das französische System HQE oder das im globalen Süden häufig verwendete Green Star Label.

2.2.2 BREEAM

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) war das erste Zertifizierungssystem und wird inzwischen in 89 Ländern der Welt, inklusive Deutschland, angewandt [13, 14].

Diese Systeme bewerteten hauptsächlich die ökologische Dimension bzw. die ökologische Qualität der Gebäude und weniger die soziale und ökonomische Dimension. Für Deutschland wurde das System angepasst und ist unter dem Namen BREEAM-DE auf dem Markt. Die Berücksichtigung der Parameter Energie, Wasser, Material, Transport, Abfall, Umwelt, Gesundheit, Management und Ökologie für Neubauten verdeutlichen den Fokus auf die ökologische Dimension [15].

Das BREEAM-System findet in Deutschland vor allem für Betriebszertifizierungen von bestehenden Gebäuden Anwendung. Dabei wird die Qualität des Betriebes in Hinblick auf die oben aufgeführten Punkte analysiert und bewertet. Zusätzlich besteht aber auch die Möglichkeit, BREEAM-Zertifikate für Sanierungs- und Neubauten zu vergeben [15].

Die Qualität des erreichten Nachhaltigkeitszertifikats wird im BREEAM durch Erfüllungsstufen eingeschätzt. Die sechsstufigen Erfüllungsstufen reichen von ausreichend über befriedigend, gut, sehr gut, exzellent bis hin zu herausragend. Die genannten Parameter der ökologischen Dimension werden dabei für eine Gesamtpunktzahl gemittelt. Ein Gebäude kann hierbei beispielsweise durch Erreichen einer gemittelten Punktzahl zwischen 70 % und 80 % der Gesamtpunkte das Zertifikat in der Erfüllungsstufe exzellent erhalten.

2.2.3 LEED

Das weltweit am meisten verbreitete Zertifizierungssystem ist das LEED-System. Das System wird in insgesamt 170 Ländern angewandt. LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) wurde 1998 in den USA entwickelt [14]. Die Kategorien infrastrukturelle Einbindung des Standortes, Grundstücksqualitäten, Wassereffizienz, Energie und globale Umweltwirkungen, Materialkreisläufe und Ressourcenschonung, Innenaumqualität, Innovationen und Boni für Kriterien

mit standortbedingt besonderer Bedeutung werden für die Gesamtbewertung betrachtet. Die Bewertung des Erfüllungsgrads ergibt sich hier über die erreichte Anzahl der Punkte. Erreicht werden können die LEED-Zertifikate in den Stufen Zertifiziert, Silber, Gold oder Platinum.

2.3 Zertifizierungssysteme der zweiten Generation DGNB, NaWoh, BNB, BNK

Die Veränderung des Fokus der Nachhaltigkeitszertifizierung der ersten Generation mit hauptsächlich ökologischer Dimension hin zu Nachhaltigkeitszertifizierung, die ganzheitlich die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit bewerten, folgte bei den Nachhaltigkeitszertifizierungen der zweiten Generation. Die Analyse der Parameter im LEED-System zeigt eine prozentuale Verteilung von 68 % ökologischer, 2 % ökonomischer und 39 % sozialer Indikatoren. BREEAM zeigt eine prozentuale Verteilung von 66 % ökologischer, 5 % ökonomischer und 29 % sozialer Indikatoren. Es zeigt sich eine deutliche Dominanz der ökologischen Indikatoren. Demgegenüber ist eine gleichgewichtete Bewertung (33 % ökologische, 30 % ökonomische, 37 % soziale Kriterien) der drei Nachhaltigkeitsdimensionen innerhalb des DGNB-Systems (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) zu erkennen [16, 17].

Die Systeme befinden sich in einem ständigen Entwicklungsprozess, an dem Anpassungen und Aktualisierungen gemacht werden. So sind die beschriebenen Gewichtungen der Dimensionen der einzelnen Systeme keine Bewertung der Vorteilhaftigkeit einer Gewichtungsart.

2.3.1 Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB)

Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) wurde 2007 gegründet und ist eine Non-Profit- und Nichtregierungsorganisation. Neben der Zertifizierung von Gebäuden ist die DGNB auch auf dem Gebiet der Fort- und Weiterbildungen im Bereich des nachhaltigen Bauens tätig.

Im Rahmen des DGNB-Systems können Zertifizierung für unterschiedliche Nutzungsvarianten erstellt werden. Dazu zählen der Neubau mit unterschiedlichen Nutzungen, Sanierungsmaßnahmen, der Betrieb von Gebäuden oder auch ganze Stadtquartiere, die auf Nachhaltigkeitsaspekte bewertet und zertifiziert werden. Grundlegend baut das DGNB-System auf die Be- trachtung der verschiedenen Nachhaltigkeitsdimensionen und die Mitberücksichtigung des Lebenszyklus des Gebäudes auf.

Die Zertifizierung erfolgt auf Basis der Bewertung der drei Nachhaltigkeitsdimensionen als ökologische, ökonomische und soziale Qualität. Die drei Dimensionen werden dabei gleichwertig gewichtet. Ergänzend werden die Aspekte der technischen Qualität, Prozessqualität und Standortqualität in die Gesamtbewertung in-

- Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos,
Johann-Dietrich Wörner (Hrsg.)

Beton-Kalender 2022

**Schwerpunkte: Nachhaltigkeit, Digitalisierung,
Instandhaltung (2 Teile)**

- der Beton-Kalender hat einen unvermindert hohen Stellenwert in den Planungsbüros, in der Bauindustrie und bei Bauproduktenherstellern
- Autor:innen aus Praxis, Normung und Forschung
- Hintergrundinformationen zur Notwendigkeit und den Zielen der DAfStb-Richtlinie „Belastungsversuche an Betonbauwerken“

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3344



2022 · 924 Seiten ·
501 Abbildungen · 183 Tabellen ·
Hardcover
ISBN 978-3-433-03344-9 € 184*
eBundle (Print + ePDF)
ISBN 978-3-433-03345-6 € 234*

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.



Energetische Balkon-sanierung

- schwer entflammbare Abdichtungs-Systemlösung (Cfl-s1) gem. EN 13501-1
- von der Dämmung bis zum Finish



Bernhard Hauke,
Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen,
Institut Bauen und Umwelt (Hrsg.)

Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz

**Konstruktive Lösungen für das Planen
und Bauen**

Aktueller Stand der Technik

- **Grundgedanken zu Lösungsansätzen der Baubranche**
- **praktische konstruktive Lösungen und Dienstleistungsangebote**
- **angewandte Wissenschaft**

Das Buch betrachtet die Themen Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz. Das Bauwesen hat hier eine wichtige Rolle. Für die von den Bauingenieuren verantworteten Hauptstrukturen wird eine Übersicht zu den technischen Möglichkeiten für das Planen und Bauen gegeben.



Bernhard Hauke (Hrsg.)
**Nachhaltigkeit,
Ressourceneffizienz
und Klimaschutz**

Konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen
Aktueller Stand der Technik

2021 · 324 Seiten · 258 Abbildungen ·
25 Tabellen

.....
Softcover

ISBN 978-3-433-03334-0 € 29,90*

.....
eBundle (Print + PDF)

ISBN 978-3-433-03334-0 € 38,90*

BESTELLEN
+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3334

tegriert. Das Gesamtergebnis wird in Form eines Erfüllungsgrades der Anforderungen ermittelt und durch Multiplikation der Gewichtung der einzelnen Qualitäten ergibt sich ein Gesamtergebnis.

Auch im DGNB-System können verschiedene Abstufungen der Erfüllungsgrade und Auszeichnungen des Gebäudes erreicht werden. Beispielsweise wird bei einem Zertifikat für einen Neubau in Silber, Gold oder Platin sowie Diamant unterschieden. Um ein DGNB-Zertifikat zu erreichen, ist ein Mindestfüllungsgrad der einzelnen Kriterien einzuhalten. Das bedeutet, dass beispielsweise ein besonders niedriges Ergebnis in der Prozessqualität dafür sorgen kann, dass der angestrebte Gesamterfüllungsgrad nicht erreicht wird [18].

2.3.2 Bewertungssystem Nachhaltigen Bauens (BNB)

Das Bewertungssystem Nachhaltigen Bauens (BNB) ist ein vom heute Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen entwickeltes Nachhaltigkeitsbewertungs- und Zertifizierungssystem. Das deutsche Gütesiegel für nachhaltiges Bauen wurde in der Zusammenarbeit mit der DGNB entwickelt und ist für den Bau von Bundesbauten verpflichtend zu verwenden. Aus diesem Grund ist die BNB-Systematik der DGNB-Systematik ähnlich. Ein grundlegendes Ziel war hierbei, dass die Bundesregierung in die Lage versetzt wurde, durch Nachweise über Nachhaltigkeitsaspekte eine Vorreiterrolle einzunehmen. Auch der private Bausektor sollte damit für das Thema des nachhaltigen Bauens sensibilisiert werden.

Anwendbar ist das BNB-System im Bereich des Neubaus für die Nutzung Büro- und Verwaltungs-, Unterrichts- sowie Laborgebäude. Zusätzlich kann das System angewandt werden für die Bewertung einer Komplettmodernisierung von Büro-, Verwaltungs- oder Unterrichtsgebäuden und eine Bewertung von nachhaltigen Außenanlagen.

Die Gewichtung der Nachhaltigkeitsdimensionen und der Querschnittsqualitäten beziehen, anders als in der DGNB-Systematik, keine Bewertung der Standortmerkmale ein. Dieser Punkt ist innerhalb der Zertifizierung anzugeben, wird aber nicht in der Gewichtung des Gesamtergebnisses mitbilanziert. Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit werden gleichwertig mit 22,5% bewertet. Zusätzlich wird im BNB-System die technische Qualität ebenfalls gleichwertig mit den Zielen der ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Qualitäten mit 22,5% bewertet. Die Prozessqualität trägt 10 % zum Gesamtergebnis bei.

Das BNB-System beinhaltet ebenfalls die Bewertung in drei Qualitätsstufen – Bronze, Silber und Gold. Die Gewichtung wird, wie beim System der DGNB, durch Gewichtung der einzelnen Faktoren und Umrechnung auf einen Gesamterfüllungsgrad bestimmt [19].

2.3.3 Nachhaltiger Wohnungsbau (NaWoh)

Das speziell für Wohnungsbauten ausgelegte Bewertungssystem ist das Nachhaltiger Wohnungsbau (NaWoh)-System. Das aktuelle NaWoh-System wurde 2016 veröffentlicht. Die Arbeitsgruppe „Nachhaltiger Wohnungsbau“ des Runden Tisches Nachhaltiges Bauen im damaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung sowie einer Reihe an Vertretern aus der Immobilien- und Wohnungsbranche haben die NaWoh-Systematik entwickelt. Auch das NaWoh-System zählt zu den Zertifizierungssystemen der zweiten Generation. Die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes und die gleichwertige Gewichtung der Nachhaltigkeitsdimensionen ist die Basis für das Zertifikat. Die Systematik ist spezifisch für die Anwendung im Wohnungsbau ausgelegt.

Der mehrgeschossige Wohnungsneubau ab sechs Wohneinheiten sowie die angepasste Zertifizierung von hauptsächlich Studentenwohnheimen im Sonderbereich Variowohnen ist der Anwendungsbereich für das NaWoh-Zertifikat. Da das System für den Wohnungsbaubereich entwickelt wurde, liegt ein Schwerpunkt auf der Bewertung der Wohnqualität, die unter der sozialen Nachhaltigkeit zu verorten ist.

Im Gegensatz zu dem DGNB-System und dem BNB-System wird bei der Zertifizierung nach NaWoh keine Gewichtung der einzelnen Qualitäten vorgenommen. Dementsprechend gibt es nur ein Erreichen oder ein Nichterreichen des Zertifikats.

Die Bewertung setzt sich zusammen aus der Wohn-, ökologischen und ökonomischen Qualität sowie der technischen Qualität. Insgesamt wird diese Qualität durch insgesamt 69 sogenannte Steckbriefe nachgewiesen. Die Nachweise werden dabei unterteilt in bewertende und beschreibende Kriterien. Diese Qualitäten beziehen sich direkt auf das zu zertifizierende Gebäude. Zusätzlich werden in dem NaWoh-System die Qualität der Planung sowie die Qualität der Ausführung des Bauprozesses ermittelt. Zusätzlich müssen Dokumente zu Standortfaktoren und eine Bedarfsplanung erbracht werden, um die lokalen Umweltbedingungen und die Marktsituation abzubilden. Alle genannten Aspekte und Qualitäten müssen vollständig nachgewiesen werden, um das NaWoh-Zertifikat zu erhalten [20].

2.3.4 Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau (BNK)

2015 wurde das Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau (BNK) durch das Bau-Institut für Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen (BiRN) veröffentlicht. Der Anwendungsbereich ist der Neubau von kleineren Wohnungsbauten mit weniger als fünf Wohneinheiten. Im Vergleich zu den dargestellten Systemen wurde das BNK-System vereinfacht. Das hat den Hintergrund, dass die Systematik besonders für den privaten Bereich, beispielsweise beim Bau des Ei-

genheimes, Nachhaltigkeitsaspekte bewertbar machen soll [21].

Die BNK-Zertifizierung setzt sich aus insgesamt 19 Steckbriefen zusammen. Die Aufteilung in die einzelnen Dimensionen der Nachhaltigkeit sind hier nicht vorhanden. Die Kriterien entsprechen größtenteils in gleicher oder ähnlicher Form Kriterien im Bewertungssystem des NaWoh.

3 Klimaschutzaspekte in der Nachhaltigkeitsbewertung

3.1 Bewertung der ökologischen Qualität im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung

Die ökologische Qualität im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung wird im Folgenden näher beschrieben. Diese umfasst beispielsweise die Themen Energie, Emissionen und Ressourcen. Diese Themen bilden die Grundlage, um die genannten Klimaschutzziele erreichen zu können.

3.1.1 Energie

In Deutschland sind rund 40 % des Gesamtenergieverbrauchs auf den Gebäudesektor zurückzuführen, davon wird ein Großteil für das Heizen von Gebäuden benötigt [22]. Aufgrund des hohen Verbrauchs stellt dieser Faktor ein effizientes Einsparpotenzial dar, den Gebäudebestand und Neubauten energieeffizienter zu gestalten. Dazu wurden bereits Anstrengungen unternommen, die sich rechtlich in die Energieeinsparverordnung (ENEV) und aktuell in dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) wiederfinden lassen.

Die Energieeffizienz eines Gebäudes wird anhand des Primärenergiebedarfs festgelegt. Der Primärenergiebedarf berücksichtigt neben dem Endenergiebedarf auch den Energiebedarf, der für die Gewinnung, Umwandlung, Speicherung und Verteilung benötigt wird. Für Wohngebäude setzt sich der Primärenergiebedarf aus dem Energiebedarf für Heizung, Warmwasseraufbereitung, Lüftung und Kühlung zusammen [23].

Die Energiebilanz eines Gebäudes ist abhängig vom individuellen Nutzerverhalten der Bewohner. Es ist vorgegeben, in welchen Fällen ein Verbrauchsausweis oder ein Bedarfssausweis erstellt wird. Entweder ist der Bedarfssausweis verpflichtend oder es darf zwischen den beiden genannten Ausweisen gewählt werden [23]. Seit November 2020 enthält der Energieausweis verpflichtend Angaben zu den Treibhausgasemissionen des gesamten Gebäudes. Die Emissionen werden aus dem Primärenergiebedarf ermittelt und für Wohngebäude als äquivalente Kohlenstoffdioxidemissionen pro Jahr und Quadratmeter Gebäudenutzfläche angegeben. Die Treibhausgasemissionen infolge des Betriebs eines Gebäudes werden berechnet als Produkt aus Energieverbrauchswert und Emissionsfaktor je Energieträger, aufsummiert für alle Energieträger [23].

Durch eine hohe Energieeffizienz des Gebäudes wird ein positiver Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Dabei muss die Bereitstellungsart der benötigten Energie sowie die Energie über den Lebenszyklus der Materialien des Gebäudes berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird in den Zertifizierungssystemen neben dem Absolutwert des Primärenergiebedarfs (PEges) auch der Anteil der erneuerbaren Primärenergie (PEe) am Gesamtprimärenergiebedarf über den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt. Der Primärenergieverbrauch wird in der Normierung unterteilt in einen Anteil aus erneuerbaren und nichterneuerbaren Quellen. Erneuerbare Quellen können bspw. Wind-, Wasser- und Solarenergie sein, nichterneuerbare Primärenergie entsteht häufig aus der Verbrennung fossiler Stoffe wie Kohle, Öl oder Erdgas. Weiter wird der Energieverbrauch als Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes unterteilt in die Form, in der sie anfallen, einerseits als Energieträger und andererseits in ihrer stofflichen Form als Energien, die im Material gespeichert werden.

3.1.2 Emissionen

Die Gestaltung eines klimaneutralen Gebäudebestandes hat bis zum Jahr 2045 zu erfolgen. Dafür müssen bereits jetzt klimaneutrale Neubaukonzepte umgesetzt und umfangreiche Sanierungsmaßnahmen am Gebäudebestand vorgenommen werden. Insbesondere sind der Energieverbrauch und der Ausstoß von Treibhausgasemissionen bei der Herstellung und dem Rückbau von Gebäuden zu berücksichtigen. Diese Faktoren gewinnen aufgrund des sinkenden Energieverbrauchs in der Nutzungsphase zunehmend an Bedeutung [24].

Bei einem Gebäude in Massivbauweise entfallen etwa 30 % bis 40 % der CO₂-Emissionen im Lebenszyklus auf die „Graue Energie“ [25]. Der Begriff „Graue Energie“ beschreibt dabei die Energie, die für die Herstellung, den Transport, die Lagerung und die Entsorgung von Materialien aufgewendet werden muss [26]. Durch den steigenden Einsatz von erneuerbaren Energien gewinnt der relative Anteil der CO₂-Emissionen aus Errichtung und Rückbau weiter an Relevanz [27]. Für die Realisierung eines klimaneutralen Gebäudes spielt daher die Reduktion der „Grauen Energie“ auch in Hinblick auf Aspekte der Ressourceneffizienz eine entscheidende Rolle.

3.1.3 Schadstoffe

Im Bauwesen ist es besonders wichtig, auf schadstofffreie Erzeugnisse zu achten, da bei einer Vielzahl von Produkten im Bauwesen ein hohes Risikopotenzial für eine Schadstoffbelastung vorliegen kann. Beispieleweise Schwermetalle, flüchtige organische Verbindungen, halogenierte Kälte und Treibmittel und Biozide zählen zu den potenziellen Schadstoffen. Risiken können dabei durch Schadstofffreisetzung für die Umwelt entstehen. Bei der Verarbeitung von Bauprodukten auf der Baustelle, aber auch während der Nutzung, kön-

nen diese Stoffe in Wasser, Boden und Luft gelangen. Aus diesem Grund ist es essenziell, bei der Herstellung und Planung von Neubauten auf die Verwendung von Produkten mit geringem Risiko und im Optimalfall auf schadstofffreie Produkte zurückzugreifen.

Neben der Risikominimierung für die Umwelt ist ein primäres Ziel die Vermeidung gesundheitlicher Beeinträchtigung des Menschen. Insbesondere muss dabei eine unbedenkliche Innenraumluftqualität sicher gestellt werden.

Im Rahmen der Zertifizierungssystematiken wird der Einsatz von emissionsarmen Bauprodukten gefordert. Dies wird nach Fertigstellung des Gebäudes über eine Innenraumluftmessung überprüft. Alternativ kann der Nachweis auch erbracht werden, wenn erwiesen wird, dass die Grenzwerte für das Stoffrecht zentrale REACH-Verordnung ((EG) Nr. 1907/2006) eingehalten werden [19, 28].

Weiter sind Schadstoffe ein entscheidendes Hemmnis bei der potenziellen Nutzung der Gebäudematerialien als Sekundärressource. Auf der einen Seite besteht bei belasteten Materialien das Risiko der Freisetzung von gebundenen Schadstoffen beim Rückbau. Auf der anderen Seite müssen belastete Gebäudeteile und Materialien aufwendig entsorgt werden und stehen der Kreislaufwirtschaft nicht mehr zur Verfügung.

3.1.4 Flächeneinsparung/Flächenversiegelung

Der Wohnflächenbedarf ist in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegen und wird voraussichtlich auch weiterhin anwachsen. Mit dem Anstieg des Wohnflächenbedarfs nimmt gleichzeitig der Flächen- und Energieverbrauch zu. Aufgrund des direkten Zusammenhangs der Faktoren besteht durch die Wohnraumreduktion, die Möglichkeit Energie und Flächen einzusparen und somit einen Beitrag zur Einhaltung der Klimaschutzziele zu leisten [29].

Der Raumwärmebedarf im Verhältnis zur Wohnfläche ist in den letzten Jahrzehnten zwar stark gesunken, für den Raumwärmebedarf pro Kopf ist jedoch nur eine leichte Abnahme zu verzeichnen. Dies ist auf den Anstieg des Wohnflächenbedarfs pro Einwohner zurückzuführen. Um den Raumwärmebedarf pro Kopf zu reduzieren, ist es daher notwendig, neben dem Raumwärmebedarf pro Wohnfläche den Wohnflächenbedarf zu verringern [30].

Zwar nimmt der Bedarf an neuem Wohnraum ab, dennoch müssen jährlich eine Vielzahl neuer Gebäude errichtet werden. Da der Neubau von Gebäuden jedoch mit einem hohen Ressourcen- und Flächenverbrauch verbunden ist, ist die effizientere Nutzung des bestehenden Wohnraums sinnvoll. Eine mögliche Lösung ist die Reduzierung des Wohnflächenbedarfs pro Einwohner [31].

Als Voraussetzung für die Reduzierung des Wohnraums gilt es, die Wohnfläche möglichst effizient zu gestalten. Ein Maßstab dafür ist die Flächeneffizienz. Diese wird unter anderem aus der Wohnfläche, der Ge-

schossanzahl, der Raumordnung und der Kompattheit des Gebäudes bestimmt. Als Flächeneffizienz wird das Verhältnis von Hauptnutzfläche zur gesamten Geschossfläche beschrieben. Nebenflächen (wie Treppenhäuser, Waschküche und Technikräume) und Konstruktionsflächen (wie Wände oder Schächte) gehören nicht zur Hauptnutzfläche. Diese Flächen können jedoch 10% bis 15% der Geschossfläche einnehmen. Zur Steigerung der Flächeneffizienz sollten daher Verkehrsflächen minimiert werden. Im Regelfall liegt der Wert der Flächeneffizienz im Wohnungsbau bei weniger als 60%. Bei einer optimalen Planung kann eine Flächeneffizienz von 70% erreicht werden.

Der Bau neuer Gebäude ist mit der Inanspruchnahme von Flächen verbunden. Die Umnutzung von Flächen in Siedlungs- und Verkehrsflächen betrug für die Zeitspanne 2000 bis 2018 rund 5880 Quadratkilometer. Dabei wurden 84% der Flächen für Siedlungszwecke vorgesehen und 16% für Verkehrszwecke. Die Bundesregierung hat es sich in der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie zum Ziel gesetzt, den täglichen Flächenverbrauch bis zum Jahr 2030 auf 30 Hektar zu reduzieren. Bis zum Jahr 2050 soll keine Inanspruchnahme zusätzlicher Siedlungs- und Verkehrsflächen mehr zulässig sein [12].

Um die Ziele der Bundesregierung bis zum Jahr 2030 zu erreichen, sind Maßnahmen für die Reduzierung der Erschließung neuer Flächen notwendig. Dazu zählt die Durchsetzung von Vorrangregelungen für die Nutzung von Brachflächen statt Freiflächen und die Verpflichtung von Entsiegelungs- und Renaturierungsmaßnahmen. Außerdem sollten kompakte Bauweisen mit einer geringen Grundflächenzahl und Gebäudeaufstockungen gefördert werden. Die Instandhaltung bestehender Bauwerke ist dem Neubau auf neu zu erschließenden Flächen vorzuziehen. Zudem sollten Neuausweisungen von Flächen nur möglich sein, wenn eine Nachverdichtung ausgeschlossen wird. Es sollte eine öffentliche Förderung für die Nutzung von Brachflächen eingeführt werden und die Öffentlichkeitsarbeit für das effiziente Wirtschaften von Bauflächen verstärkt werden. Darüber hinaus sind die Voraussetzungen für die Nutzung von ungenutzten Bauflächen zu schaffen und es sollten Ausgleichsmaßnahmen für versiegelte Flächen umgesetzt werden [32, 33].

3.1.5 Wasser

Bei der ökologischen Dimension der Nachhaltigkeit wird als ein primäres Schutzziel die Ressourcenschönung und dabei neben Baumaterialien und Bauprodukten, Flächeninanspruchnahme, die Erhaltung und Förderung der Biodiversität sowie Energie auch Wasser genannt. Ziel ist, den Aufwand für die Trinkwassergewinnung sowie die Abwasseraufbereitung zu reduzieren und die Störung des natürlichen Wasserkreislaufs zu vermindern. Dazu müssen am Gebäude geeignet Maßnahmen getroffen werden, um den Wasserbedarf zu verringern. Die Erstellung eines

umfänglichen Wasserkonzeptes mit Berücksichtigung von Trinkwasser, Abwasser, Niederschlagswasser und Grauwasser stellt eine Maßnahme dar.

3.1.6 Nachwachsende Rohstoffe

Nachwachsende Rohstoffe (Nawaro) sind definiert als land- und forstwirtschaftlich erzeugte Produkte, die stofflich verwertet werden oder für die Herstellung von Wärme, Strom oder Kraftstoffen eingesetzt werden [34]. Es handelt sich dabei um pflanzliche oder tierische Rohstoffe. Im Bausektor werden Nawaro vor allem für den Roh- und Ausbau, zur Dämmung und partiell auch für Lacke, Farben und Klebstoffe verwendet [35]. Zu den eingesetzten Baumaterialien zählen Holz, Stroh, Lehm, Wolle, Schilf, Flachs, Hanf oder Kork, wobei Holz der am häufigsten verwendete nachwachsende Baustoff ist [36].

Die Zusammenhänge von Holzbau und Klimaschutz werden in Hafner und Vogelsberg (2021) [37] erläutert und das Potenzial des Baustoffes Holz (im Sinne des Klimaschutzes) dargestellt, Kohlenstoff zu speichern und Substitutionseffekte umzusetzen. Durch die technische Machbarkeit des aktuellen Holzbaus mit seinen Themen Holzbaustoffe, Tragwerk, Brandschutz, Schallschutz und Vorfertigungsmöglichkeiten hat sich das Bauen mit Holz in den letzten Jahren stark verändert. Gerade für Konstruktionen in mehrgeschossigen Gebäuden in den Gebäudeklassen 4 und 5, in denen vorwiegend Massivholzbauweise und Skelettbauweise zum Einsatz kommen, hat sich dadurch viel verändert [37].

3.2 Kernthema Lebenszyklusbetrachtung (LCA)

Die Erstellung und der Betrieb von Gebäuden sowie der Rückbau haben Auswirkungen auf die Klimaschutzziele und direkt auf die umgebene Umwelt. Die Methode der ökologischen Bilanzierung von Gebäuden (Lebenszyklusanalyse – Life Cycle Assessment (LCA) oder Ökobilanz) wurde entwickelt, um diese Umweltwirkungen ganzheitlich abschätzen und quantifizieren zu können.

3.2.1 LCA Normung

Eine Ökobilanz stellt eine etablierte Methode zur Quantifizierung der Umweltwirkungen eines Produktes oder eines Produktsystems dar. Ein Gebäude ist ein Produkt bzw. ein Produktionsystem. Die Normierung nach DIN EN ISO 14040 definiert die Ökobilanz als „*Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges*“ [38]. Die normativen Grundlagen zur ökologischen Bilanzierung von Gebäuden sind die Normen DIN EN 15978 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden“ sowie DIN EN 15804 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltpunktdeklarationen“ [39, 40].

3.2.2 Lebenszyklusphasen

Der Lebenszyklus eines Gebäudes besteht aus verschiedenen Phasen, die in der Ökobilanz berücksichtigt werden. Diese Phasen sind der Rohstoffabbau zur Herstellung der Baustoffe über die Verarbeitung, die Nutzungsphase des Gebäudes, den Rückbau bis hin zur Aufbereitung oder Verwertung der Materialien. Bei der ökologischen Bilanz wird grundlegend unterschieden in die Herstellungs- und Errichtungsphase (Modul A), Nutzungsphase (Modul B) und die Entsorgungsphase (Modul C). Außerhalb dieses Systems gibt es die Möglichkeit, ergänzende Informationen des Lebenszyklus des Gebäudes zu deklarieren (Modul D). Definiert werden die Lebenszyklusphasen in den Normen DIN EN 15978 auf Gebäudeebene und DIN EN 15804 auf Bauproduktbene. In Bild 2 werden die Lebenszyklusphasen nach Norm dargestellt. Die Berechnung von Instandsetzungsmaßnahmen in Modul B2-4 wird bestimmt durch die zu erwartende Lebensdauer und der damit verbundenen Austauschzyklen der einzelnen Bauteile. Nutzungsdauern von Bauteilen werden in einer vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) veröffentlichten Tabelle zur Verfügung gestellt [41].

Das Gesamtergebnis der Berechnungsmethodik der Ökobilanz beinhaltet die Summierung der sowohl aus den Materialien als auch aus den betrieblich ausgelösten Umweltwirkungen. Um den Arbeitsaufwand der Erstellung zu reduzieren und gleichzeitig eine vergleichbare Datengrundlage zu schaffen, gibt es Datenbanken, die Umweltwirkungen als Input- und Outputgrößen der jeweiligen Stoffe angeben. Die in Deutschland gängigste Datenbank ist die Ökobaudat-Datenbank. Veröffentlicht durch das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) dient sie als eine öffentliche, kostenlose Datenbank und stellt Informationen zu Baumaterialien, Bau- und Transportprozessen zur Verfügung.

Im Rahmen der Nachhaltigkeitszertifizierungen von Gebäuden sind Ökobilanzen Teil des Kriteriums der ökologischen Qualität von Gebäuden. Ökobilanzergebnisse werden in Wirkungskategorien sowie in Beschreibungen des Ressourceneinsatzes unterteilt.

Das Treibhauspotenzial beschreibt den zusammengerechneten Ausstoß von verschiedenen Klimagassen in Form von CO₂-Äquivalenten. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Verweildauern der Klimagase wird eine Integrationszeit von in der Regel 100 Jahren (GWP100) angenommen. Das Treibhauspotenzial ist der zurzeit wichtigste Indikator zur Beschreibung des anthropogenen Anteils am Treibhauseffekt.

Neben der Berechnung von CO₂-Äquivalenten soll eine Berechnung des Primärenergieverbrauch Aufschluss über die durch das Gebäude verursachten Energieverbräuche geben (vgl. Abschnitt 3.1).

Die Ergebnisse von Ökobilanzen können einerseits Aufschluss über die durch das Gebäude ausgelösten Umweltwirkungen geben, andererseits bieten sich

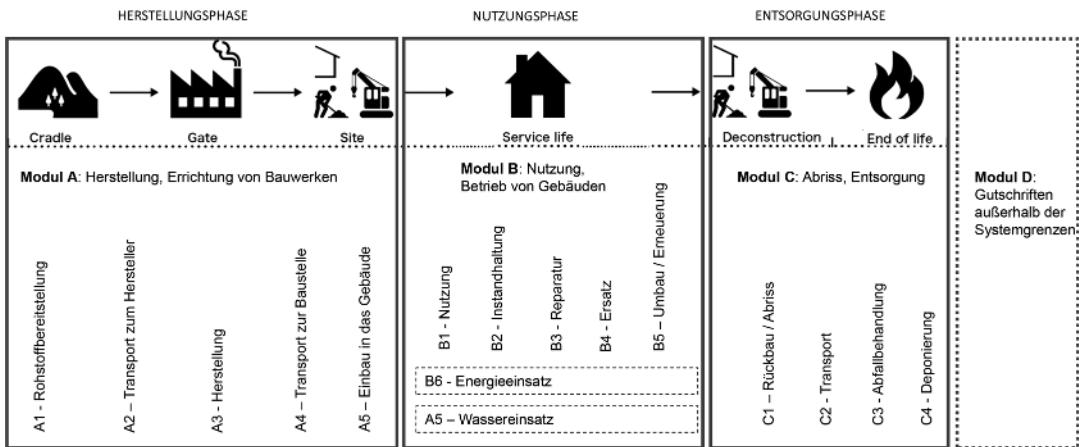


Bild 2. Lebenszyklusmodule einer Ökobilanz nach DIN EN 15804 und DIN EN 15978 [39, 40]

Ökobilanzergebnisse besonders für den Vergleich unterschiedlicher Varianten von Gebäuden an. Um diese vergleichenden Ökobilanzen beispielsweise den Vergleich verschiedener Baukonstruktionen zu erreichen, wird ein funktionales Äquivalent erarbeitet. Dieses beschreibt die technischen Anforderungen der zu vergleichenden Gebäude als Grundlage für den Vergleich. Häufig wird das funktionale Äquivalent als 1 m² Bruttogrundfläche angegeben.

3.3 Aktuelle Trends

3.3.1 Nachhaltigkeitsbewertung (QNG)

Die Systeme der Nachhaltigkeitszertifizierung werden ständig weiterentwickelt. 2022 wurde das Qualitätsiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) von dem Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen veröffentlicht und ist damit die aktuellste Variante eines Nachhaltigkeitssystems in Deutschland. Das Qualitätssiegel ist ein staatliches Qualitätssiegel für Gebäude. Um das Siegel zu erhalten, müssen Anforderungen der drei Nachhaltigkeitsdimensionen erfüllt werden. Das Siegel ist in zwei Anforderungsstufen, Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude Plus (QNG-Plus) und Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude Premium (QNG-Premium) unterteilt. Die Anforderungsniveaus orientieren sich dabei an überdurchschnittlichen Anforderungen (QNG-PLUS) bzw. deutlich überdurchschnittlicher Anforderungen (QNG-PREMIUM) hinsichtlich der nachhaltigkeitsrelevanten Merkmale und Eigenschaften. Das Zertifizierungsverfahren besteht dabei aus einem für das Siegel registriertem Bewertungssystem und der Zertifizierung nach einem der beiden Anforderungsniveaus des QNG. Aktuell sind die Bewertungssysteme der DGNB, NaWoh und BNK (Abschnitt 2.3) als Voraussetzung für die Vergabe des QNG zugelassen. Um das QNG-Siegel zu erhalten, muss das Gebäude darüber hinaus definierte Anforderungen erfüllen. Die Anforderungen unterscheiden sich dabei je nach Anwendungsfall. Für

die Maßnahme Neubau bestehen Anforderungen an die Treibhausgasemissionen und den Primärenergiebedarf, nachhaltige Materialgewinnung, Vermeidung von Schadstoffen und Barrierefreiheit. Diese Kriterien sind grundsätzlich auch Teil der vorgestellten Nachhaltigkeitszertifizierungssysteme, jedoch stellt das QNG deutlich verschärzte Anforderungen an diese Kriterien. Insbesondere bei den Kriterien der Gebäudeökobilanz (Treibhausgasemissionen und Primärenergiebedarf) sind sowohl der Grenzwert als auch die Rechenvorschrift abweichend von den anderen Zertifizierungssystemen. Neben den wie in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen zu berechnenden Modulen (Herstellung, Instandhaltung, Abfallbehandlung und Entsorgung) muss in Modul B6 (Nutzungsphase) zusätzlich zu dem Energiebedarf für den Betrieb (Modul B6.1) eine Pauschale für den Energiebedarf der Nutzer (Modul B6.3) berücksichtigt werden.

Grundsätzlich sind drei der vier für das QNG-Zertifikat geforderten Kriterien bei dem Anwendungsfall Neubau Wohngebäude der ökologischen Dimension zuzuordnen. Damit geht die Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitszertifizierung weg von der gleichwertigen Gewichtung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit hin zu einer höheren Gewichtung der ökologischen Dimension.

3.3.2 Umsetzung im GEG

Seit November 2020 ist das Gebäudeenergiegesetz (GEG) in Kraft getreten. Mit dem GEG wurde das bis dahin anzuwendende Energiespargesetz (EnEG), die Energieeinsparverordnung (EnEV) und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEWärmeG) abgelöst und zusammengefasst. Grundsätzliches Ziel des GEG ist es, den Energiebedarf von Gebäuden weiter zu senken und die Nutzung erneuerbarer Energien zu erhöhen. Für Neubauten wird der Energiestandard eines Niedrigstenergiegebäudes festgelegt. Dieser entspricht in Deutschland augenblicklich noch einem KfW-Effizienzhaus 55. Eine weitere Neuerung ist, dass im Ener-

geausweis neben dem Energiebedarf auch verpflichtend die CO₂-Emissionen von Gebäuden angegeben werden müssen.

2022 trat die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) in Kraft. In dieser wurden die früheren Förderprogramme zur Förderung von Energieeffizienz und erneuerbarer Energie im Gebäudebereich zusammenfasst. Bereits im Januar 2022 musste die Förderung wieder gestoppt werden, da die Anträge auf Förderung des KFW-Effizienzhaus 55 die bereitgestellten Mittel überstiegen. Nach einer Überarbeitung der Fördersätze und Förderbedingungen läuft die Förderung bis zum 31.12.2022.

Die Modifizierung der Förderung hatte zur Folge, dass nur noch Effizienzgebäude 40 in Kombination mit dem QNG-Siegel gefördert werden. In der Förderung werden diese als Effizienzhaus-/Effizienzgebäude-Stufe 40 Nachhaltigkeit (NH) bezeichnet. Die grundlegende Aufnahme der Nachhaltigkeitsdimensionen als Voraussetzung für eine Förderung gab es bis dahin nicht. Der Fokus von energieeffizienten Gebäuden verschiebt sich damit hin zu nachhaltigem Bauen und der Bewertung des gesamten Lebenszyklus der Gebäude.

4 Beispielhafte Bewertung im Wohnungsbau

Anhand einer beispielhaften Bewertung von typischen Wohnungsbauden wird methodisch die Systematik bei der Ökobilanzierung im aktuellen QNG dargestellt. Hierzu werden erst die Rahmenbedingungen festgelegt und die Beispielgebäude beschrieben und dann in Abschnitt 5 die Ergebnisse erläutert. Die Darstellungen in Abschnitt 4 und 5 berufen sich auf aktuelle Veröffentlichungen [42, 43].

4.1 Rahmenbedingungen

4.1.1 Lebenszyklusanalyse von Gebäuden

Die im Allgemeinen im Abschnitt 3.2 erläuterte Ökobilanz (LCA) ist eine Methode zur ganzheitlichen Analyse der potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems oder einer Dienstleistung während des gesamten Lebenszyklus.

Die in dieser Studie angewandte Berechnungsmethode und die betrachteten Lebenszyklusphasen folgen dem BNB [44], NaWoh [45] und BNK [46].

So werden innerhalb der Systemgrenze die Module A1-A3 (Produktion), Modul B2 (Instandhaltung) und B4 (Ersatz) sowie die Module C3-C4 (Abfallbehandlung, Entsorgung), Modul B6 (betrieblicher Energieeinsatz) betrachtet. Das Modul D (Vorteile und Belastungen) wird als Informationsmodul gesondert dargestellt. Die in dieser Studie betrachteten Module können in Bild 2 eingesehen werden.

Das Modul B6 ist unterteilt in B6.1 (Energieverbrauch von Gebäuden, geregelt), B6.2 (Energieverbrauch von

Gebäuden, nicht geregelt, z. B. Aufzüge) und B6.3 (nutzer- und belegungsbezogener Energieverbrauch, siehe Abschnitt 3.2.2). Der betriebliche Energieverbrauch (Modul B6.1) wird in die Berechnung nach dem GEG einbezogen. Die Werte des Endenergiebedarfs werden in den LCA-Berechnungen verwendet. Die zukünftige Einbeziehung des Energieverbrauchs von Energieverbrauchern, die gebäudebezogenen Energieverbrauch verursachen, aber nicht in der GEG enthalten sind, einschließlich Aufzügen (B6.2 – derzeit nicht enthalten), wird derzeit diskutiert. Internationale Normen für die Bestimmung des Energieverbrauchs sowie für die Bilanzierung von GWP-Emissionen in der Nutzungsphase erlauben die Einbeziehung von z. B. Aufzügen, siehe ISO 16745-1:2017 [47].

Der Bezugszeitraum der Studie ist auf 50 Jahre festgelegt, in Anlehnung an die im Abschnitt 2.3.2 und Abschnitt 2.3.3 im Detail vorgestellten Zertifizierungssysteme BNB [44] und NaWoh [45].

4.1.2 Gebäuderahmenbedingungen

Gebäudetypologie

Der methodische Ansatz zur Gebäudetypologie folgt König (2011) [48], in dem ein System für die Nutzungs-kategorie „Wohngebäude“ entwickelt wurde. Dieses System wurde durch folgende Typologien ergänzt:

Ein-/Zweifamilienhaus

- ein- und zweigeschossige Einfamilienhäuser

- zweigeschossige Doppel- und Reihenhäuser

Mehrfamilienhaus (MFH)

- Laubenganghaus

- Punkthaus

- Zeilenhaus-2-Spänner

- Zeilenhaus-3-Spänner

- Zeilenhaus-4-Spänner

- 3- und mehrgeschossige Mehrfamilienhäuser

Die Anzahl der Stockwerke liegt zwischen 3 und 8.

Konstruktionsarten

In König (2017) [11] wurde ein Einfamilienhaus in sechs verschiedenen Bauweisen modelliert. Die Berechnungsergebnisse zeigten eine Differenzierung der Ökobilanzwerte in die Gruppe „mineralische Bauweise“, hier konventionell genannt, und die Gruppe „nachwachsende Rohstoffe“. In Hafner und Schäfer (2017) [49], Hafner et al. (2017) [50] und Özdemir et al. (2022) [42] wurde die gleiche Differenzierung verwendet, um MFH über den gesamten Lebenszyklus zu vergleichen. Gebäude, die überwiegend aus nachwachsenden Materialien bestehen, werden in dieser Arbeit als zukunftsorientierte Gebäude bezeichnet.

Daher werden alle Gebäude in dieser Studie in zwei Bauweisen modelliert.

Die Bezeichnung der Bauweisen ist:

- (A) „konventionell“ und
- (B) „zukunftsorientiert“ (Nawaro/recycelte Produkte/kohlenstoffarme Produkte in der Zukunft).

Energetischer Standard

Im Rahmen dieser Studie werden für die betrachteten Gebäude die von der KfW definierten Energiestandards KfW 55 und KfW 40 betrachtet.

Daraus ergeben sich die folgenden energetischen Alternativen:

- KfW 55
- KfW 40

4.1.3 Umweltindikatoren

In dieser Studie wird der Umweltindikator Primärenergiebedarf nichterneuerbar (PENRT) betrachtet, welcher den Einsatz von Primärrohstoffen (in diesem Fall Energieträgern) im Lebenszyklus repräsentiert. Außerdem wird das Treibhauspotenzial (GWP), welches die Auswirkungen auf die globale Umwelt und den Klimaschutz zeigt, dargestellt.

Die LCA-Ergebnisse der Gebäude für die Indikatoren werden pro funktionaler Einheit von einem m² BGF und Jahr dargestellt. Darüber hinaus sind die Ergebnisse der Indikatoren in die Module A, B2-4, C und B6 unterteilt. Die Definition und der Inhalt der Module sind in Abschnitt 3.2 erläutert. Die Indikatoren GWP und PENRT werden stellvertretend für die potenziellen Umweltauswirkungen bestimmt und sind den Abschnitten 5.1 und 5.2 zu entnehmen.

4.2 Gebäudeübersicht

Auf Basis der entwickelten Systematik wurde ein Datenpool von Gebäuden zusammengestellt, der in Tabelle 1 dargestellt ist. Zusätzlich wurde eine weitere Unterteilung des MFH-Gebäudetyps anhand der brandschutztechnisch relevanten Gebäudeklassen (GK) vorgenommen. „MFH klein“ entspricht der GK 3, während „MFH groß“ in die GK 4 und 5 eingeordnet wird.

Ab GK 4 ist der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen als Dämmung oder in der Konstruktion nicht ohne kompensatorische Maßnahmen wie Gipskartonverkleidungen oder Sprinkleranlagen möglich, die dann zu einem erhöhten, für die Ökobilanzberechnungen relevanten Materialeinsatz führen.

4.3 Einbezug von Nutzerstrom und Einbezug/ Bewertung der Photovoltaikanlage

Die Forderung, den Energiebedarf von Gebäuden zunehmend mit erneuerbarer Energie zu decken, führt tendenziell zu Gebäuden, die nicht nur Energieverbrauchen, sondern auch selbst Energie im oder am Gebäude oder auf dem Gelände erzeugen oder produzieren. In einigen Fällen wird eine Verpflichtung zur Installation von Photovoltaikanlagen (PV) dis-

Tabelle 1. Gebäudetypen, Materialart, Bruttogeschoßfläche, Energiestandard, Gebäudeklasse

Nr.	Gebäudekategorie	Kürzel Studie	Gebäudekonstruktion	BGF [m ²]	energetischer Standard	Gebäudeklasse	
1	EFH/ZFH	1-A-55	Kalksandstein	184	KfW 55	GK1/2	
		1-B-55	Holz				
		1-A-40	Kalksandstein		KfW 40		
		1-B-40	Holz				
2	MFH klein	2-A-55	Kalksandstein	560	KfW 55	GK3	
		2-B-55	Holz				
		2-A-40	Kalksandstein	572	KfW 40		
		2-B-40	Holz				
3		3-A-40	Porenbeton	1773	KfW 40 Passivhaus	GK3	
		3-B-40	Holz				
4	MFH groß	4-A-55	Stahlbeton	2108	KfW 55	GK4	
		4-B-55	Holz				
5		5-A-40	Porenbeton bzw. Stahlbeton	2717	KfW 40 Passivhaus	GK4	
		5-B-40	Holz				
6		6-A-55	Kalksandstein	9115	KfW 55	GK4	
		6-B-55	Holz				
7		7-A-55	Porenbeton	1280	KfW 55	GK4	
		7-B-55	Holz				
8		8-A-40	Porenbeton	2033	KfW 40 Passivhaus	GK5	
		8-B-40	Holz				

Tabelle 2. Szenarien 1 bis 5: Vollständige Berücksichtigung von Konstruktion und Haustechnik und Betrachtung des Betriebs B6 differenziert in B6.1 und B6.3

	Graue Emissionen	PV			Betrieb B6	
	Konstruktion und technische Ausstattung	PV-Anlage	Nutzerverbrauch	Export	B6.1	B6.3
	Module A-C					
Szenario 1	×				×	
Szenario 2	×				×	×
Szenario 3	×	0 %	0 %	100 %	×	×
Szenario 4	×	25 %	25 %	75 %	×	×
Szenario 5	×	50 %	50 % (+ Batterie)	50 %	×	×

kutiert. Daher muss die Frage beantwortet werden, wie die erzeugte Energie in die Ökobilanz einbezogen und der maximale Eigenverbrauch abgebildet werden kann. Methodische Ansätze finden sich in der EN 15643:2021 [51] und in der wissenschaftlichen Literatur [52–55]. Im Folgenden werden Benchmarks vorgestellt, die dies bereits berücksichtigen. Sie beruhen auf nachfolgend dargestellten Prinzipien. Diese wurden im Jahr 2021 entwickelt und bilden nun das Grundkonzept für die Berechnungsregeln in einem neuen Label für das QNG [56] (vgl. Abschn. 3.3.1).

- Erweiterung der Systemgrenzen von Modul B6 um B6.2 und B6.3 mit einer Pauschale von 20 kWh/m² a für den Strombedarf der Nutzer,
- Dimensionierung und Ertragsbestimmung für PV unter standortspezifischen Bedingungen,
- Ermittlung des Eigenverbrauchsanteils in Bezug auf B6.1, B6.2 und B6.3,
- B6.2 (Aufzüge) in diesem speziellen Fall nicht berücksichtigt,
- Angabe der Auswirkungen der exportierten Energie als zusätzliche Information, die nicht in der Bilanz enthalten ist,
- Zurechnung der „Grauen Energie“ von PV zum Gebäude in der Größenordnung des selbst genutzten Anteils der erzeugten Energie.

In einer Sonderauswertung wurde der Einfluss von Modul 6.3 in B6 in verschiedenen Szenarien für „Gebäude 2“ mit dem energetischen Standard KfW 40 durchgeführt. Die Gebäudekonstruktion und die Haustechnik wurden in den Szenarien vollständig berücksichtigt. Die Szenarien sind wie in Tabelle 2 dargestellt aufgebaut.

4.4 Sonderthema „Gebäude mit Kellergeschoss“

4.4.1 Repräsentative Gebäude

Als Datengrundlage für diese Berechnungen dient ein mittelgroßes, bereits umgesetztes Mehrfamilienhaus. Das ursprüngliche Gebäude wurde in nachhaltiger Bauweise, überwiegend in Holzbauweise, und nach dem energetischen Standard KfW 55 realisiert. Die Datenbasis wurde um das gleiche Gebäude mit dem Standard KfW 40 erweitert. Auf der Grundlage dieser

Gebäude wurden funktionale Äquivalente in konventioneller Bauweise erstellt. Die Erstellung eines äquivalenten Gebäudes garantiert die funktionale Gleichwertigkeit des für die vergleichende Ökobilanzstudie verwendeten Gebäudes. Die Äquivalente haben mineralische Baustoffe und entsprechen dem aktuellen Stand der Technik und Bauweise. Sie haben die gleichen Grundrisse und technischen Standards wie die „originalen“ Holzgebäude (z. B. Haustechnik, Anzahl der Bäder etc.). Die Bauteile des „ursprünglichen“ Holzbaus (Außenwände, Innenwände, Decken, Dächer) wurden durch mineralische Baustoffe mit den gleichen energetischen und technischen Funktionen ersetzt. Die Datenbasis wurde um die o. g. Gebäude erweitert und um ein Kellergeschoss ergänzt.

Die folgende Tabelle 3 zeigt die Konstruktionen und die Flächenwerte der Gebäude. Durch diese Betrachtung soll der Einfluss eines Kellergeschosses herausgearbeitet werden.

5 Ergebnisse

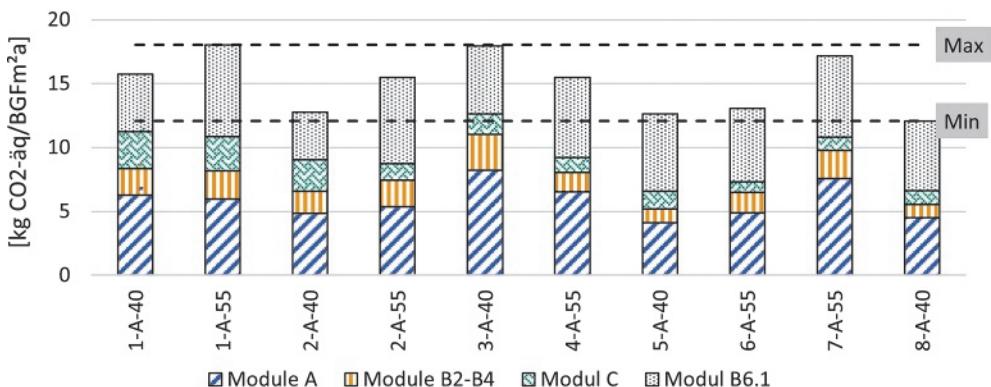
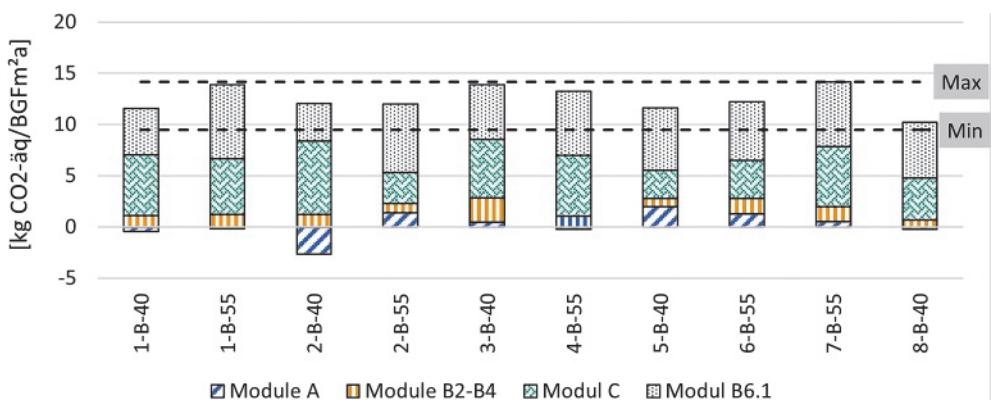
Die Ergebnisse für acht Gebäude aus Tabelle 1 sind für GWP und PENRT dargestellt und in Bauweise A (konventionelle Bauweise) und B (zukunftsorientierte Bauweise) unterteilt. Die gestrichelten Linien zeigen die Minimal- und Maximalwerte als Grundlage für das Benchmarking und die Zielsetzung an. Die Bezugseinheit ist die BGF.

5.1 LCA-Ergebnisse GWP

Bild 3 zeigt die Ökobilanzergebnisse für die Gebäudevariante A. Bild 4 zeigt die Ökobilanzergebnisse für die Gebäudevariante B. Die Maximal- und Minimalwerte für die Variante A liegen zwischen 12 und 18 kg CO₂-Äq./m² BGF und Jahr, was einen Wertekorridor von 6 kg CO₂-Äq./m² BGF und Jahr ergibt. Für Variante B liegen die Maximal- und Minimalwerte zwischen 10 und 14 kg CO₂-Äq./m² BGF und Jahr, woraus sich ein Wertekorridor von 4 kg CO₂-Äq./m² BGF und Jahr ergibt.

Tabelle 3. Analysierte Gebäude und Konstruktionen

Nr.	Konstruktion	BGF [m ²]	NRF [m ²]	Keller	Bauteile Konstruktion					
					1 Fundament	2 Außenwand	3 Innenwand	4 Decke	5 Dach	6 Balkon
2-A-55	Kalksandstein, reduzierte Haustechnik	560	457		Stahlbeton	KS+WDVS mit PS	KS/GK	Stb	Holz, MW-Dämmung	Stahl/Holz
		744	597	x						
2-B-55	Holzrahmen, reduzierte Haustechnik	560	457		Holzrahmen, Zellulose, Holzschalung	Holzrahmen + GK	BSH, Beton	Holz, Zellulose- dämmung	Stahl/ Brettstapel	Stahl/Holz
		744	597	x						
2-A-40	Kalksandstein, reduzierte Haustechnik	572	464		KS+WDVS mit PS	KS/GK	Stb	Holz, MW-Dämmung	Stahl/Holz	Stahl/Holz
		756	605	x						
2-B-40	Massivholzbauweise (10 cm), reduzierte Haustechnik	572	464		Massivholz, Zellulose, Holzschalung	Holzrahmen + GK	BSH, Beton	Massivholz, Zellulose- dämmung	Stahl/ Brettstapel	Stahl/Holz
		756	605	x						

**Bild 3.** Ökobilanzergebnisse für den GWP-Indikator für alle Gebäude in Variante A**Bild 4.** Ökobilanzergebnisse für den GWP-Indikator für alle Gebäude in Variante B

Der Wertekorridor wird zum einen durch die Größe der Gebäude beeinflusst, zum anderen wurde bei der Auswahl der repräsentativen Gebäude für die MFH eine möglichst große Bandbreite unterschiedlicher MFH in Bezug auf die Anzahl der Wohnungen und die Gebäudetypen modelliert. Die Variationen verdeutlichen auch die große Bandbreite an Gebäudeoptionen in den Alternativen A und B und die Bemühungen der Architekten, Gebäude mit geringen „Grauen Emissionen“ zu schaffen.

Das Treibhauspotenzial ist in der Herstellung (A1-A3) und im Betrieb (B6.1) über den gesamten Lebenszyklus in der Alternative A am höchsten. In der Variante B hingegen ist das GWP in der Herstellungsphase sehr gering oder sogar negativ. Dies ist auf den in Holzbauprodukten gespeicherten biogenen Kohlenstoff zurückzuführen, ausgedrückt als GWP-biogen. Dieser Vorteil wird am Ende des Lebenszyklus durch die höheren Werte in Modul C (-1/+1-Ansatz) vollständig kompensiert. Dennoch sind bei Alternative B die GWP-Werte aller Gebäude über den gesamten Lebenszyklus hinweg niedriger. Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten lassen sich durch die Wahl

der Bauweise (Graue Emissionen) für Variante A – konventionelles und B – zukunftsorientiertes Gebäude erklären. Hier wird für jedes Gebäude das identische funktionale Äquivalent berechnet. Daher sind die Emissionen aus Modul B6.1 für beide Varianten gleich. Die Unterschiede ergeben sich ausschließlich aus der Wahl der Materialien/Bauweise.

5.2 LCA-Ergebnisse PENRT

Bild 5 zeigt die LCA-Ergebnisse für Gebäudevariante A. Bild 6 zeigt die LCA-Ergebnisse für Gebäudevariante B. Die Maximal- und Minimalwerte für Variante A liegen zwischen 165 und 255 MJ/m² BGF und Jahr bzw. 45,8 und 70,8 kWh/m² BGF und Jahr, sodass der Wertekorridor 90 MJ/m² BGF und Jahr bzw. 25 kWh/m² BGF und Jahr beträgt. Für Variante B liegen die Mindest- und Höchstwerte zwischen 140 MJ/m² BGF und Jahr und 220 MJ/m² BGF und Jahr, bzw. 38,9 kWh/m² BGF und Jahr 61,1 kWh/m² BGF und Jahr.

Auch hier sind die LCA-Ergebnisse für den PENRT-Indikator bei Variante B tendenziell niedriger.

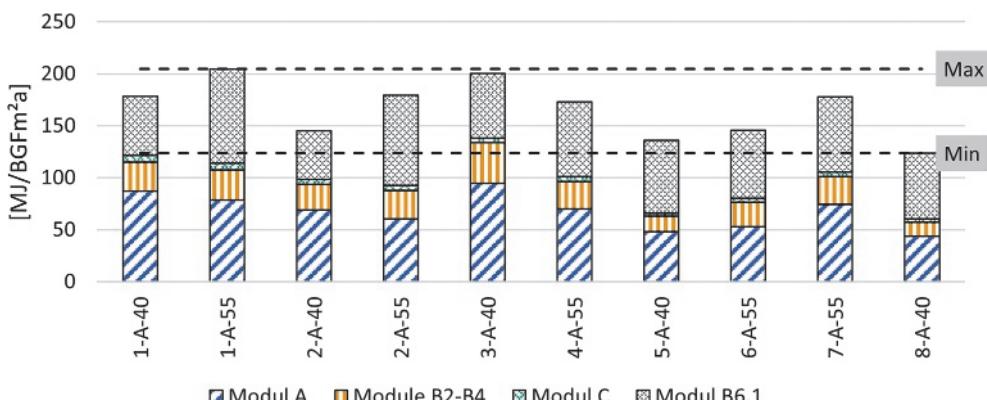


Bild 5. Ökobilanzergebnisse für den PENRT-Indikator für alle Gebäude in Variante A

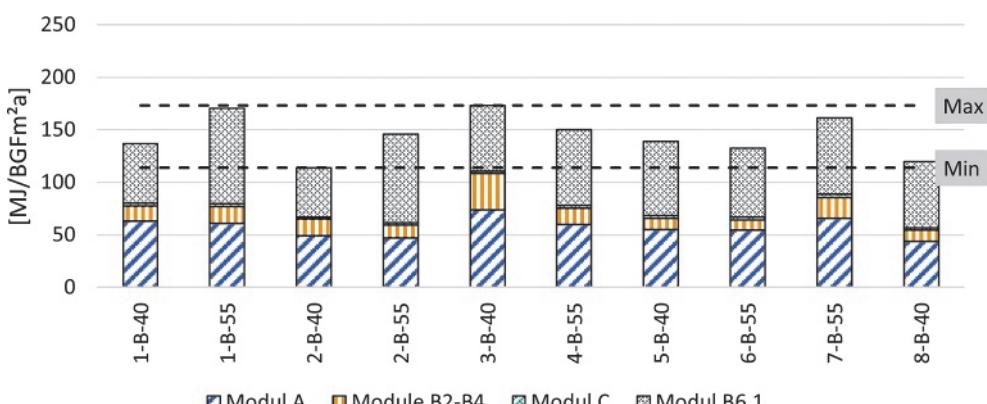


Bild 6. Ökobilanzergebnisse für den PENRT-Indikator für alle Gebäude in Variante B

Es zeigt sich, dass die Grauen Emissionen über den Lebenszyklus von Gebäuden in KfW 55 und KfW40 nicht mehr vernachlässigt werden können. Sie stellen eine Stellschraube dar, die weiter optimiert werden muss. Die höchsten Emissionen wurden in Modul A1-3 gefunden, was nicht verwunderlich ist, da die unterschiedlichen Bauweisen in diesem Modul den größten Einfluss haben. Eine weitere Optimierungsmöglichkeit bieten die Emissionen, die durch den Austausch von Bauteilen im Lebenszyklus entstehen (Modul B4). Hier gilt: je weniger Austausch, je langlebiger die Konstruktion, desto niedriger die Werte. Die Entsorgungsphase (Modul C3-C4) hat einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

5.3 Sensitivitätsanalyse zum Energieverbrauch im Betrieb einschließlich Modul B6.3

Im Folgenden wurde das Ausmaß des Einflusses von B6.1 und B6.3 auf das gesamte B6 für jedes Szenario analysiert. Die LCA-Ergebnisse werden für den GWP-Indikator differenziert nach den Bauvarianten A (Bild 7) und B (Bild 8) dargestellt. Die Ergebnisse zu PENRT sind in ihrer Wirkung ähnlich wie die Ergebnisse zu GWP, daher werden nur die GWP-Ergebnisse dargestellt. Die verschiedenen Szenarien sind in Tabelle 2 beschrieben. In Tabelle 4 sind nur die Schlussfolgerungen aufgeführt. Es ist zu beachten, dass die eingesparten Emissionen durch Netzeinspeisung (Modul D) nicht in eine Ökobilanz eines Gebäudes eingerechnet werden.

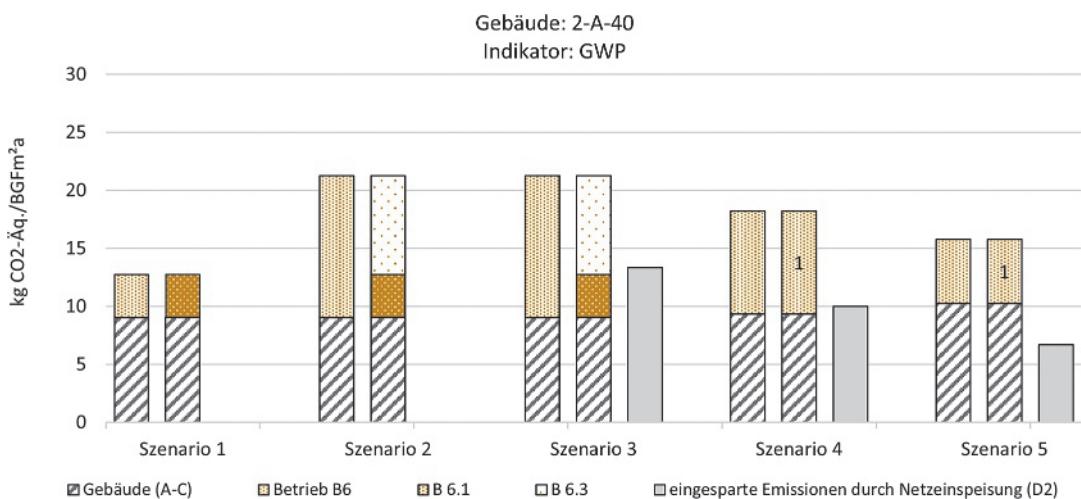
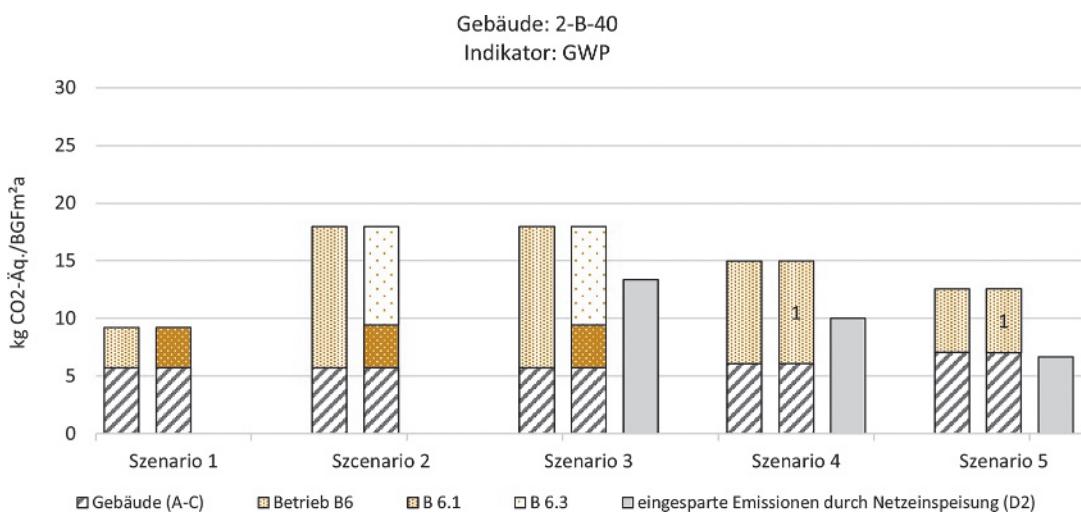


Bild 7. Ökobilanzergebnisse für die 5 Szenarien für den Indikator GWP für Variante A



(1) Es gibt keine Zuordnung von Reduktionseffekten zwischen B6.1 und B6.3; im Allgemeinen ist B6 niedriger

Bild 8. Ökobilanzergebnisse für die 5 Szenarien für den Indikator GWP für Variante B

Tabelle 4. Schlussfolgerungen aus den Szenarien 1–5

Szenario	Wirkung/Effekte
1	B6 variiert in den Varianten A und B nicht, während der Unterschied in den Modulen A-C auf die Unterschiede in der Bauweise der Gebäude zurückzuführen ist.
2	Mit der Hinzunahme des Moduls B 6.3 wird das Gesamtmodul B6 in den Varianten A und B gleichermaßen erhöht. Die bereits in Szenario 1 aufgetretene Differenz bleibt identisch.
3	Die von der PV erzeugte Energie wird zu 100 % exportiert. Da die PV keinen Einfluss auf das Modul B6 hat, wird die PV-Anlage nicht in das Gebäude einbezogen, sodass die Ökobilanz davon unberührt bleibt.
4	Der Einfluss der Konstruktion (Modul A-C) ändert sich durch die anteilig anrechenbare PV-Anlage. Bei der Eigennutzung der durch die PV-Anlage erzeugten Energie (hier 25 %) werden 25 % der Grauen Emissionen dem Gebäude und die anderen 75 % der exportierten Energie (D2) zugeschrieben.*). Der Einfluss des Betriebs in B6 ist geringer, da die PV-Anlage zu 25 % auf den Eigenverbrauch angerechnet wird und somit die betrieblichen GWP-Emissionen um diesen Betrag reduziert.**) Die potenziell vermiedenen Emissionen an anderer Stelle als Folge der exportierten Energie werden in Modul D2 angegeben.
5	Der Einfluss der Konstruktion ändert sich durch die anteilig anrechenbare PV-Anlage und den gesamten Lebenszyklus-Energiebedarf und die GWP-Emissionen der Batterie. Der Einfluss des Betriebs ist geringer (6.1 + 6.3), da die PV-Anlage B6.3 zu 50 % für den Eigenverbrauch angerechnet wird und somit den Energieverbrauch und die GWP-Emissionen im Betrieb reduziert. Der separat ausgewiesene Effekt der potenziell vermiedenen Emissionen bei Dritten wird um 50 % reduziert. Der Effekt des exportierten Stroms entspricht in Variante B nahezu den baubedingten Emissionen, nicht aber in Variante A.

*) Die exportierte Energie ist daher nicht frei von Emissionen.

**) Die Eigennutzung der Energie wird in B6 mit einem Emissionsfaktor von 0 berücksichtigt.

5.4 Ergebnisse Sonderthema „Gebäude mit Kellergeschoß“

5.4.1 LCA-Ergebnisse GWP

In Bild 9 und Bild 10 sind die Ergebnisse für den Indikator GWP in kg CO₂-äq./BGF m²a und kg CO₂-äq./NRF m²a in den Modulen A, B2-4, C und B6 für die in Tabelle 3 aufgeführten Gebäude dargestellt. Die Ergebnisse werden in den Abschnitten 5.4.1 bis 5.4.4 interpretiert.

5.4.2 Vergleich der Ergebnisse zukunftsorientiertes/konventionelles Gebäude

Werden die funktional gleichwertigen Gebäude in Bild 9 und Bild 10 miteinander verglichen, so fällt auf, dass das GWP in den Modulen A1–A3 über 50 Jahre bei der konventionellen Bauweise am größten ist. Bei der zukunftsorientierten Bauweise ist das GWP in Modul A sehr gering oder sogar negativ. Dies ist auf den in den Holzbauprodukten gespeicherten biogenen Kohlenstoff zurückzuführen. In Abschnitt 5.1 wird der Einfluss des biogenen Kohlenstoffs über den gesamten Lebenszyklus erläutert.

Die Emissionen des Moduls B6 sind für die beiden Gebäudevarianten konventionell und zukunftsorientiert gleich, da beide die gleiche technische Ausstattung für die Heizung verwenden und den gleichen energetischen Standard erreichen. Die Unterschiede ergeben sich nur durch die veränderte Materialwahl und Konstruktion.

Diese Erkenntnis lässt sich sowohl in den Ergebnissen zu BGF als auch zu NRF nachweisen.

5.4.3 Vergleich der Ergebnisse BGF/NRF

Sowohl nicht unterkellerte konventionelle Gebäude als auch zukunftsorientierte Gebäude schneiden in allen Modulen generell besser ab, bezogen auf die BGF. Dieses Ergebnis ist logisch, da das Gesamtergebnis durch eine größere Bezugsfläche geteilt wird. Im Allgemeinen ist es jedoch so, dass bei nicht unterkellerten Gebäuden das Verhältnis zwischen BGF und NRF mit den auf dieser Referenzfläche ermittelten GWP-Werten übereinstimmt. Bei unterkellerten Gebäuden besteht ein erheblicher Unterschied zwischen den auf der Referenzfläche BGF und NRF ermittelten GWP-Werten. Dies liegt an der meist sehr geringen NRF (beheizten) im Kellergeschoß, die nach DIN 277 durch die gesamte Gebäudemasse geteilt wird. Dies führt zu einer Verschlechterung der Gesamtbewertung des Gebäudes in Bezug auf den NRF bei Gebäuden ohne Untergeschoß. Diese Gesamtbewertung ist jedoch abhängig von den Größen der Module A-C und B6 und den damit verbundenen Bezugsflächen, die oft unterschiedlich sind. Es wäre sinnvoll, bei unterkellerten Gebäuden die Gebäudemasse (Modul A-C) und den Betrieb (Modul B6) getrennt zu betrachten. Die betriebliche Nutzung erfolgt in der Regel im Bereich der NRF. So mit sind die Ergebnisse von B6 bezogen auf NRF realistisch, bezogen auf BGF wären sie zu positiv berechnet. Bei der Gebäudemasse, Modul A-C, verhält es sich umgekehrt. Diese Masse umfasst das gesamte Gebäude. Somit wäre die Berücksichtigung dieser Module auf NRF zu unvorteilhaft bewertet, auf BGF ist sie realistisch.

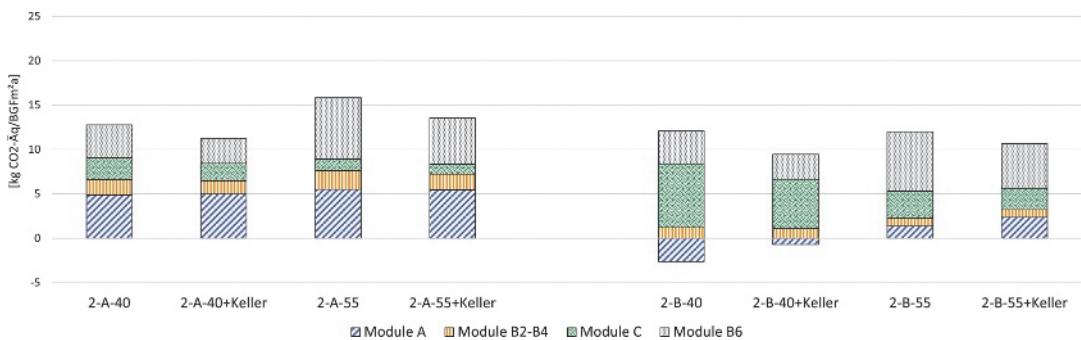


Bild 9. Ergebnis GWP [kg CO₂-äq./BGF m² a], Variante A (konventionelle Bauweise) und Variante B (Holzbauweise) dargestellt pro m² BGF

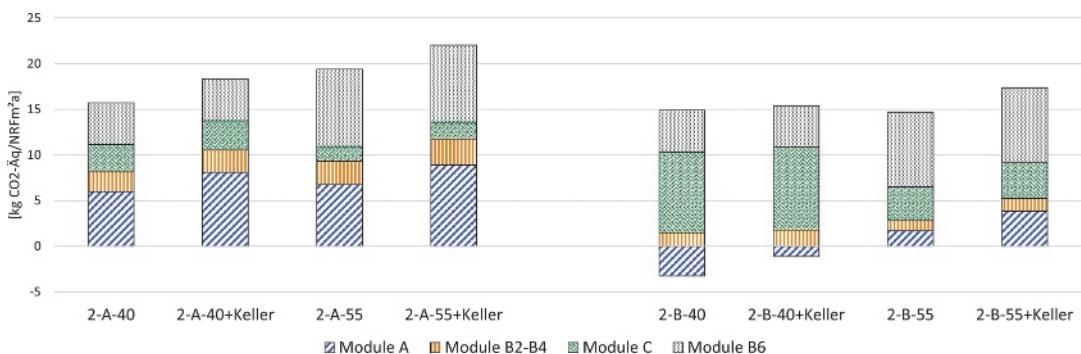


Bild 10. Ergebnis GWP [kg CO₂-äq./NRF m² a], Variante A (konventionelle Bauweise) und Variante B (Holzbauweise) dargestellt pro m² NRF

5.4.4 Vergleich mit/ohne Keller

Beim Vergleich der Emissionen eines Gebäudes ohne und mit Untergeschoss muss auch die Bezugsfläche, in diesem Fall BGF und NRF, berücksichtigt werden, da die Ergebnisse davon abhängen.

Bei der Gesamtbetrachtung von Gebäude und Betrieb werden die Ökobilanzergebnisse oft zu gleichen Teilen durch die größere Fläche, die BGF, geteilt. Beim Vergleich von Gebäuden desselben Typs mit und ohne Untergeschoss über den gesamten Lebenszyklus zeigt sich, dass die unterkellerten Gebäude in der BGF-Berechnung besser abschneiden, d. h. ein geringeres GWP aufweisen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Berücksichtigung des Kellers zu einer Erhöhung des Referenzwertes führt. Wird der Keller nicht beheizt, wie es bei Wohngebäuden üblich ist, bleibt der Energiebedarf auch bei Hinzunahme eines Kellers gleich. Wird er dennoch auf die BGF inkl. Keller bezogen, verbessert sich dieser Wert. Aufgrund des hohen Anteils des energetischen Betriebs (betriebliche Emissionen, Modul B6) hat dies einen enormen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

Unterkellerte Gebäude profitieren hier im Gegensatz zu nicht unterkellerten Gebäuden und die Zielwerte können leichter erreicht werden.

Werden die Gesamtergebnisse in Bezug auf den gesamten Lebenszyklus und die NRF der nicht unterkellerten Gebäude mit denen der unterkellerten Gebäude verglichen, so zeigt sich, dass die unterkellerten Gebäude schlechter abschneiden, d. h. einen höheren GWP-Wert aufweisen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die gesamten Gebäudeteile des Untergeschosses einzogen werden, aber nur durch die NRF geteilt wird, die oft nur einen kleinen Teil der Fläche im Untergeschoss einschließt. Für die Module A-C ergeben sich dadurch schlechtere Werte, da die NRF nicht auf die gesamte Gebäudemasse bezogen ist. Somit wirkt sich die Gesamtberechnung eines unterkellerten Gebäudes, bezogen auf die NRF, unvorteilhaft aus.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse für nicht unterkellerte Gebäude in Bezug auf beide Referenzflächen relativ und realistisch sind. Die Gesamtbewertung von unterkellerten Gebäuden wird im Vergleich zur BGF besser und im Vergleich zur NRF schlechter dargestellt. Dies ist im Allgemeinen unabhängig von der Bauweise. Darüber hinaus ist auf den Unterschied zwischen konventionellen und in zukunftsorientierter Bauweise erbauten Gebäuden und auf die Unterschiede im Modul A hinzuweisen. Bei den konventionellen Gebäuden in Bezug auf die BGF

bleibt das Modul A von ohne Untergeschoss zu mit Untergeschoss relativ gleich. Dies liegt daran, dass sich das bisher in den Obergeschossen befindliche Material, meist mineralische Baustoffe, durch das Untergeschoss in Bezug auf die größere BGF relativ erhöht wird.

Bei den Gebäuden in zukunftsorientierter Bauweise hingegen fällt auf, dass sich das Modul A im Vergleich beim unterkellerten Gebäude, bezogen auf die BGF, relativ stark verschlechtert. Dies ist auf den nun verhältnismäßig stark erhöhten Einsatz an mineralischer Masse aus Stahlbeton im Untergeschoss zurückzuführen. Dieses Beispiel verdeutlicht den großen negativen Einfluss von Untergeschossen.

5.4.5 Schlussfolgerung

Die Berücksichtigung des Kellergeschosses führt zu einer Erhöhung der Bezugsgröße durch die Hinzurechnung der Kellerfläche. Zum einen erhöhen sich die eingesetzten Materialmassen und die Grauen Emissionen, zum anderen verringern sich die Kennwerte durch die vergrößerte Bezugsfläche, durch die die Werte geteilt werden. Das kennwertbezogene Gesamtergebnis wird reduziert. Wird das Untergeschoss nicht beheizt, bleibt der Energiebedarf gleich. In der Gesamtbewertung von Gebäude und Betrieb werden die Ökobilanzergebnisse jedoch durch die größere Fläche BGF geteilt. Dadurch reduziert sich der Betriebsanteil deutlich. Unterkellerte Gebäude sind gegenüber nicht unterkellerten Gebäuden im Vorteil, da sie ihre Ziele leichter erreichen können.

Hinsichtlich der Gebäudestruktur zeigt sich, dass die Kennwerte des unterkellerten und des nicht unterkellerten Gebäudes in konventioneller Bauweise leicht unterschiedlich sind. Bei Gebäuden, die überwiegend in Holzbauweise errichtet werden, verschlechtern sich die Kennwerte deutlicher, da das Kellergeschoss im Stahlbetonbau eine relativ höhere Belastung bedeutet. Der Grund dafür ist, dass diese Gebäude in der Regel ohne Kellergeschoss wesentlich leichter sind. Werden die Gebäude um ein Kellergeschoss ergänzt, verschlechtern sich die Ergebnisse zwangsläufig, da dieses aus Beton bestehen muss.

Diese Unterschiede spiegeln sich in allen hier vorgestellten Vergleichen zwischen dem nicht unterkellerten und dem unterkellerten Gebäude wider, sowohl für den Holzbau als auch für den konventionellen Bau. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass mit dem BGF- oder NRF-Referenzwert keine Gesamtbewertung für den Lebenszyklus von Wohngebäuden vorgenommen werden kann. Für eine korrekte Bewertung der „Grauen Emissionen“ muss die Berechnung der Gebäudeemissionen (Modul A-C) in Bezug auf die BGF, die Emissionen aus dem Betrieb (Modul B6) in Bezug auf die NRF erfolgen.

Auch kann für die Ermittlung der betrieblichen Emissionen kein pauschaler Wert, z. B. ein Prozentsatz der NRF, angenommen werden. Hierfür gibt es viele Gründe:

Einerseits gibt es Einfamilienhäuser mit Kellergeschossen, in denen keine beheizten Wohnräume vorhanden sind. Andererseits gibt es gerade im Bereich der Einfamilienhäuser ausgebaute Keller mit beheizten Funktionsräumen. Ein kleines Mehrfamilienhaus hat oft einen Keller, der als Abstellraum, Technikraum oder Wasch- und Trockenraum genutzt wird. Große Mehrfamilienhäuser haben Keller, die aber nur zur Hälfte als Abstell- und Sozialräume genutzt werden, die andere Hälfte wird oft als Tiefgarage genutzt. Die Unterbringung des ruhenden Verkehrs ist eine Mobilitätsfrage, die nichts mit dem Gebäude und seiner Wohnnutzung zu tun hat.

6 Diskussion und Schlussfolgerung

In Deutschland ist der Übergang von einem Bottom-up-Ansatz, bei dem Benchmarks anhand von Typenvertreter gebildet werden, zu einem Top-down-Ansatz, bei dem Benchmarks aus planetarischen Grenzen abgeleitet werden, noch nicht abgeschlossen.

Eine entscheidende Rolle nimmt dabei die Frage der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit ein. In dem vorgestellten System werden Vertreter der Gebäudetypen von tatsächlich realisierten Gebäuden abgeleitet, um die praktische Durchführbarkeit aufzuzeigen. Dies entspricht dem „Best-in-Class“-Ansatz bei den Zielwerten.

Die Wahl der Benchmarks für Wohngebäude folgt einem fundierten Detailierungsgrad. Die Gebäudetypenvertreter decken eine große Varianz an Gebäuden ab. In der Untersuchung wurde keine Unterscheidung zwischen kleinen und großen Wohngebäuden vorgenommen und es wurden Benchmarks für beide Teile – Graue Emissionen und betriebliche Emissionen – ermittelt.

Fragen zum Umgang mit standortbedingten Schwierigkeiten oder Differenzen, wie z. B. Bodenverhältnisse, können noch nicht beantwortet werden.

Anhand des in diesem Beitrag behandelten Sonderthemas konnte aufgezeigt werden, dass in Bezug auf die Referenzflächen weiterer Diskussions- und Forschungsbedarf besteht. Um Ungenauigkeiten vorzubeugen, sollten mehrere Referenzflächen parallel angegeben werden.

Die Benchmarks sollten in Zukunft ein weiteres Anforderungsniveau berücksichtigen, das als Zielwert ein ausgeglichenes Emissionsziel (Netto-Null) berücksichtigt. Dabei sollte die Einführung sukzessive erfolgen; zuerst den Betrieb berücksichtigen und im weiteren Verlauf den gesamten Lebenszyklus einbeziehen.

Die aus den Verfahren abgeleiteten endgültigen Benchmarks sind in [56] zu finden.

7 Fazit

Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Studie zeigen auf, wie wichtig normkonforme und konsistente Rahmenbedingungen für einen transparenten Vergleich sind. Benchmarks können einen Weg weisen, welcher die jetzt umzusetzenden neuen Gebäude zum einen auf die Klimaschutzziele und zum anderen auch auf die Ressourceneffizienz hin mit klaren Vorgaben optimiert werden können. Weiterhin bestätigt sich die Relevanz von Ökobilanzen. Durch die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus vergleichbarer Gebäude mittels Umweltindikatoren lassen sich für den Klimaschutz wichtige Ressourcen quantifiziert und große Einsparpotenziale aufzeigen.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt (2022) *Übereinkommen von Paris* [online]. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/uebereinkommen-von-paris#ziele-des-uebereinkommens-von-paris-uvp> [Zugriff am: 31. Juli 2022]
- [2] Europäische Kommission (2019) *Der europäische Grüne Deal* [online]. https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_de.pdf [Zugriff am: 25. Juli 2022]
- [3] Europäische Kommission (2020) *Renovierungswelle: Verdoppelung der Renovierungsquote zur Senkung von Emissionen, zur Ankurbelung der wirtschaftlichen Erholung und zur Verringerung von Energiearmut* [online]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/ip_20_1835/IP_20_1835_DE.pdf [Zugriff am: 24. Juli 2022]
- [4] Europäische Kommission (2022) *EU-Taxonomie: Kommission legt ergänzenden delegierten Klima-Rechtsakt vor, um die Dekarbonisierung zu beschleunigen* [online]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/ip_22_711/IP_22_711_DE.pdf [Zugriff am: 24. Juli 2022]
- [5] Bundesverfassungsgericht (2021) *Leitsätze zum Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021* [online]. https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Downloads/DE/2021/03/rs20210324_1bvr265618.pdf?__blob=publicationFile&v=6 [Zugriff am: 24. Juli 2022]
- [6] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nucléare Sicherheit (2021) *Klimaschutz in Zahlen – Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik Ausgabe 2021* [online]. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Tools/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf [Zugriff am: 24. Juli 2022]
- [7] Herrmann, E. [Hrsg.] (2022) *Bauwende – Klimabewusst erhalten, erneuern, bauen: Zukunft Bau Kongress 2021*. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).
- [8] Hafner, A. (2021) *Bauen für Klimawandel und Resourcenschonung* in: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung [Hrsg.] *Zukunft Bau Kongress 2021 – Bauwende*, S. 78–83.
- [9] United Nations (1987) *Report of the World Commission on Environment and Development – Our Common Future* [online]. <https://www.un.org/documents/1874042.pdf> [Zugriff am: 24. Juli 2022]
- [10] Die Bundesregierung (2022) *Beschlüsse für mehr Tempo beim Klimaschutz* [online]. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/globaler-klimaschutz-1974042> [Zugriff am: 28. Juli 2022]
- [11] König, H. (2017) *Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden. Lebenszyklusanalyse mit Berechnung der Ökobilanz und Lebenszykluskosten* [Endbericht]. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- [12] Die Bundesregierung (2021) *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie* [online]. [https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998194/1875176/3d3b15cd92d0261e7a0bcd8f43b7839/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-langfassung-download-bpa-data.pdf](https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998194/1875176/3d3b15cd92d0261e7a0bcdc8f43b7839/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-langfassung-download-bpa-data.pdf) [Zugriff am: 24. Juli 2022]
- [13] Friedrichsen, S. (2018) *Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen – Kriterien für Neubau und Bauen im Bestand*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [14] Lazar, N.; Chithra, K. (2022) *Green Building Rating Systems from the prospect of sustainability dimensions through the building lifecycle* in: Environmental science and pollution research international 29, Nr. 34, pp. 51054–51064. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16682-5>
- [15] TÜV SÜD Industrie Service GmbH *Was ist BREEAM Neubau?* [online]. <https://breeam.de/breeam/zertifizierungssysteme/neubau> [Zugriff am: 24. Juli 2022]
- [16] Ebert, T.; Eßig, N.; Hauser, G. (2010) *Zertifizierungssysteme für Gebäude – Nachhaltigkeit bewerten, Internationaler Systemvergleich, Zertifizierung und Ökonomie*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.
- [17] Danish Building Research Institute, 3XN Architects (2018) *Guide to Sustainable Building Certifications* [online]. <https://build.dk/Assets/Guide-to-sustainable-building-certifications/Guide-to-sustainable-building-certifications-August-2018-e-bog.pdf> [Zugriff am: 24. Juli 2022]
- [18] DGNB Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V. [online]. <https://www.dgnb.de/de/index.php> [Zugriff am: 31. Jul. 2022]
- [19] *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen* [online]. <https://www.bnbnachhaltigesbauen.de> [Zugriff am: 31. Juli 2022]
- [20] *Qualitätssiegel Nachhaltiger Wohnungsbau* [online]. <https://www.nawoh.de> [Zugriff am: 31. Juli 2022]

- [21] Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau (BNK) [online]. <https://www.bau-irn.com>
- [22] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie *Ein gutes Stück Arbeit. Mehr aus Energie machen Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz* [online]. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/nationaler-aktionsplan-energieeffizienz-nape.pdf?__blob=publicationFile&v=6 [Zugriff am: 31. Jul. 2022]
- [23] Gebäudeenergiegesetz (GEG) (2020). unabhängig veröffentlicht.
- [24] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie *Innovationen für die Energiewende 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung* [online]. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/7-energieforschungsprogramm-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=16 [Zugriff am: 31. Juli 2022]
- [25] Mahler, B.; Idler, S.; Nusser, T.; Gantner, J. (2019) *Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus Abschlussbericht* [online]. <https://www.re-source.com/wp-content/uploads/2019/11/UBA-2019-Energieaufwand-Gebaeudekonzepte.pdf> [Zugriff am: 31. Juli 2022]
- [26] Zentrum Ressourceneffizienz [Hrsg.] *Ressourceneffizienz im Bauwesen. Von der Planung bis zum Bauwerk* [online]. https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/Broschueren/VDI_ZRE_Broschuere_Ressourceneffizienz_im_Bauwesen_Web_bf.pdf [Zugriff am: 31. Jul. 2022]
- [27] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2019) *Klimaschutzbericht 2019 zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung* [online]. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzbericht_2019_kabinettzfassung_bf.pdf [Zugriff am: 31. Jul. 2022]
- [28] Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des europäischen Parlamentes und des Rates – REACH (18. Dezember 2006).
- [29] Umweltbundesamt (2019) *Flächensparend Wohnen Energieeinsparung durch Suffizienzpolitiken im Handlungsfeld „Wohnfläche“* [online]. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-05_texte_104-2019_energieverbrauchsreduktion_ap1_wohnen_final.pdf [Zugriff am: 31. Juli 2022]
- [30] Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand – dena-GEBÄUDEREPORT [online]. https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaudereport.pdf [Zugriff am: 31. Juli 2022]
- [31] Henger, R.; Voigtländer, M. (2019) *IW-Wohnungsbedarfsmodell. Ist der Wohnungsbau auf dem richtigen Weg?* [online] in: IW-Report.
- [32] Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (2009) *Flächenverbrauch einschränken – jetzt handeln – Empfehlungen der Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt* [online]. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/e6e82d01.pdf> [Zugriff am: 31. Juli 2022]
- [33] Umweltbundesamt *Flächensparen – Böden und Landschaften erhalten* [online]. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechenspa-ren-boeden-landschaften-erhalten#massnahmen-und-instrumente> [Zugriff am: 31. Juli 2022]
- [34] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.) *Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen* [online]. https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch%C3%BCCre_Baustoffe_Web.pdf [Zugriff am: 31. Juli 2022]
- [35] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2008) *Bauen mit nachwachsenden Rohstoffen* [online]. https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/buergerinfo/2009_HMUELVetIW_U_Greiff_Bauen-mit-nachwachsenden-Rohstoffen.pdf [Zugriff am: 31. Juli 2022]
- [36] Heimische nachwachsende Rohstoffe im Einsatz für das „Haus der Zukunft“. *Bauen mit nachwachsenden Rohstoffen* [online]. https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/nw_pdf/fofo/fofo4_02_de.pdf [Zugriff am: 31. Juli 2022]
- [37] Hafner, A.; Vogelsberg, A. (2021) *Bauen mit Holz in: Hauke, B. [Hrsg.] Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz: Konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen: Aktueller Stand der Technik*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [38] DIN EN ISO 14040:2009-11 (2009) *Umweltdmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO-14040:2006)*; dt. u. engl. Fass. EN ISO 14040:2006. Berlin: Beuth.
- [39] DIN EN 15804:2020-03 (2020) *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltpunktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*; Dt. Fass. EN 15804:2012+A2:2019. Berlin: Beuth.
- [40] DIN EN 15978:2012-10 (2012) *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode*; Dt. Fass. EN 15978:2011. Berlin: Beuth.
- [41] Nutzungsdauren von Bauteilen – Informationsportal Nachhaltiges Bauen – Nutzungsdauren von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) (2021) [online]. <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauren-von-bauteilen> [Zugriff am: 10. Juni 2021]
- [42] Özdemir, Ö. et al. (2022) *Next generation of life cycle related benchmarks for low carbon residential buildings in Germany* in: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 290 (2022) IOP Publishing, Berlin.
- [43] Hartmann, C.; Özdemir, Ö.; Hafner A. (2022) *What is the impact of a basement on a building LCA and what role does the functional unit play?* in: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 290 (2022) IOP Publishing, Berlin.

- [44] Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen (2015) [online]. https://www.bnbnachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebäude/neubau/v_2015/BNB_BN_2015_LCA-Bilanzierungsregeln_II.pdf [Zugriff am: 11. Juli 2022]
- [45] Nachhaltigkeit im Wohnungsbau – NaWoh – Nachhaltiger Wohnungsbau (2016) [online]. <https://www.nawoh.de> [Zugriff am: 11. Juli 2022]
- [46] Bau-Institut für Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen GmbH *Was ist das BNK-System? BiRN* [online]. <https://www.bau-irn.com/bnk-system-qng/was-ist-das-bnk-system> [Zugriff am: 25. Juli 2022]
- [47] ISO 16745-1:2017-05 (2017) *Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken – Grundlagen für die Bilanz der Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase eines Gebäudes – Teil 1: Berechnung, Berichte und Kommunikation.* Berlin: Beuth.
- [48] König, H. (2011) *Entwicklung von Grundlagen und Datensätzen für Orientierungs-, Grenz- und Zielwerte für die ökologische Bewertung von Gebäuden.*
- [49] Hafner A.; Schäfer S. (2017) *Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level.* in: Journal of Cleaner Production 2, H. 167, pp. 630–642.
- [50] Hafner, A.; Rüter, S.; Ebert, S.; Schäfer, S.; König, H.; Cristofaro, L. d.; Diederichs, S.K.; Kleinhenz, M.; Krechel, M. (2017) *Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau).*
- [51] DIN EN 15643:2021-12 (2021) *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken; Dt. Fass. EN 15643:2021.* Berlin: Beuth.
- [52] Caspelle, R.; Taerwe, L.; Frangopol, D.M. [Hrsg.] (2019) *Life cycle analysis and assessment in civil engineering – Towards an integrated vision.* London: CRC Press.
- [53] Frischknecht, R. et al. (2019) *Environmental benchmarks for buildings: needs, challenges and solutions – 71st LCA forum, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 18 June 2019* in: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24, H. 12, pp. 2272–2280. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01690-y>
- [54] König, H.; Cristofaro, M.L. de (2012) *Benchmarks for life cycle costs and life cycle assessment of residential buildings* in: *Building Research & Information* 40, H. 5, pp. 558–580. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.702017>
- [55] Röck, M. et al. (2020) *Embodied GHG emissions of buildings – Critical reflection of benchmark comparison and in-depth analysis of drivers* in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 588, H. 3, S. 32048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/3/032048>
- [56] Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) – Anhang 3.1.1 zur ANLAGE 3 Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude, Stand 25.06.2021 (2021) [online]. https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/QNG-BEG/QNG_GMS_311_Anlage_3_LCA_Bilanzregeln_Wohngeb%C3%A4ude_210625.pdf

