

Ausgewählte Nachhaltigkeitsaspekte und Effizienzpotenziale von Deckenkonstruktionen

Selected sustainability aspects and efficiency potentials of ceiling constructions

Till Schöttler, Bergische Universität Wuppertal, Pauluskirchstraße 7, 42285 Wuppertal, schoettler@uni-wuppertal.de
Prof. Manfred Helmus, Bergische Universität Wuppertal, Pauluskirchstraße 7, 42285 Wuppertal, helmus@uni-wuppertal.de
Jun.-Prof. Jutta Albus, Technische Universität Dortmund, August-Schmidt-Straße 8, 44227 Dortmund, jutta.albus@tu-dortmund.de

Kurzfassung

Der Klimawandel und der Umgang mit dessen Folgen zählen zu einer der zentralen Herausforderungen der Menschheit im 21. Jh. [1] Allein in Deutschland sind 41 Prozent der Treibhausgasemissionen auf den Bau und Betrieb von Gebäuden zurückzuführen [Stand: Juli 2021]. [2] Bei Stahlbetonbauten beträgt der Anteil von Deckenelementen ca. 45 – 55 Prozent der Gesamtbetonmasse. [3] Um den Ausstoß von Treibhausgasen zu verringern, bietet sich hier die Abwägung alternativer Konstruktionsmethoden an. Ziel ist es daher, verschiedene Deckensysteme hinsichtlich nachhaltiger Konstruktionsaspekte zu vergleichen und ausgewählte Umweltindikatoren zu betrachten. Im Fokus der Untersuchung steht das ganzheitliche Aufzeigen wesentlicher Parameter. Zu den verglichenen Deckensystemen gehören: Die Stahlbetondecke, Stahlbeton-Hohldielendecke, Holzbalkendecke, Brettstapeldecke, Holz-Beton-Verbunddecke und Ziegel-Einhängendecke. Ausgewählte Umweltindikatoren wie das Globale Erwärmungspotenzial-Total (GWPT), Nicht Erneuerbare Primärenergie-Total (PENRT), Erneuerbare Primärenergie-Total (PERT) etc. werden mittels ökologischer Betrachtung analysiert. Ergänzend werden u. a. Herstellungsprozesse und Recyclingpotenziale verschiedener Materialien identifiziert, relevante Kostenkennwerte gegenübergestellt, innovative Ansätze des ressourcenschonenden Bauens eingeordnet.

Abstract

Climate change and dealing with its consequences are one of the central challenges of humanity in the 21st century. [1] In Germany alone, 41 percent of greenhouse gas emissions are attributed to the construction and operation of buildings (as of July 2021). [2] In the case of reinforced concrete structures, the proportion of ceiling elements accounts for approximately 45 – 55 percent of the total concrete mass. [3] To reduce greenhouse gas emissions, the evaluation of alternative construction methods is a viable option. The goal is to compare different ceiling systems in terms of sustainable design aspects and consider selected environmental indicators. The focus of the investigation lies in comprehensively demonstrating essential parameters. The compared ceiling systems include reinforced concrete ceiling, reinforced concrete hollow core slab, timber beam ceiling, cross-laminated timber ceiling, wood-concrete composite ceiling, and brick-inlay ceiling. Selected environmental indicators such as Global Warming Potential-Total (GWPT), Primary Energy Non-Renewable-Total (PENRT), Primary Energy Renewable-Total (PERT), etc., are analyzed through an ecological perspective. Additionally, manufacturing processes and recycling potentials of various materials are identified, relevant cost values are compared, and innovative approaches to resource-efficient construction are assessed.

1 Einleitung

Nur wenige Aktivitäten des Menschen sind derartig klimaschädlich wie die Errichtung und Nutzung von Gebäuden. Nach einem aktuellen Bericht des European Academies Science Advisory Council (EASAC) – ein Zusammenschluss der Nationalen Akademien der Wissenschaften der EU-Mitgliedsstaaten, Norwegens und der Schweiz – sind 25 Prozent der Treibhausgasemissionen Europas auf den Energieverbrauch von Gebäuden zurückzuführen. Angaben der Vereinten Nationen zufolge sind im Jahr 2020 weltweit rund 40 Prozent der energiebezogenen

CO₂-Emissionen sowie mehr als die Hälfte des Ressourcenverbrauchs durch die Baubranche entstanden. In Deutschland verursacht der Bau und Betrieb von Gebäuden, gemäß einer Studie des Forschungsunternehmens Prognos AG, rund 41 Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen (Stand: Juli 2021). [2]

Die Industrialisierung machte mittels neuer Produktionstechniken die Entwicklung neuer Baustoffe sowie die Mengenskalierung bei der Baustoffherstellung möglich. [3] Die Verarbeitung und Herstellung großer

Baustoffmengen hat unter anderem Auswirkungen auf die Umwelt des Menschen. Somit zählen der Klimawandel und der Umgang mit dessen Folgen zu einer der zentralen Herausforderungen der Menschheit im 21. Jh. Der Bausektor ist für einen großen Anteil am Ausstoß von klimaschädlichen Treibhausgasen verantwortlich. Demzufolge hat dieser einen wesentlichen Einfluss auf den Klimawandel. Hierzu tragen sowohl die Herstellung von Baustoffen als auch die Bereitstellung von Heiz- und Kühlenergie bei. [1] Auch die Gebäude selbst sind dem Klimawandel ausgesetzt. In der nachstehenden Abbildung werden einige Einwirkungen auf ein Gebäude gezeigt, deren Häufigkeit und Stärke unter anderem vom Klimawandel abhängen.

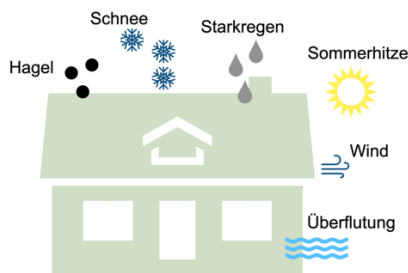


Bild 1 Folgen des Klimawandels, Einwirkungen auf Gebäude, Eigene Darstellung in Anlehnung an [1]

Der Neu-, Aus- und Umbau von Siedlungen, Gewerbe-, Verkehrs- und Infrastrukturf lächen ist mit dem Abbau von Rohstoffen verbunden. In Deutschland sind mehr als 70 Prozent der abgebauten Rohstoffe auf die Bauindustrie zurückzuführen; bei Kies, Sanden und gebrochenen Natursteinen beträgt der Anteil 95 Prozent. Die genannten Materialien werden primär als Zuschläge für Beton, Mörtel, Asphalt, Kalksandstein oder als Tragschicht, Frostschutzmittel sowie als Splitte oder Schotter genutzt. Demzufolge steht die Produktionsmenge im direkten Verhältnis zum Bauvolumen. Bei weiteren Baumineralien geht es um Quarzsande und -kiese, Kalk- und Mergelgesteine, Gips- und Anhydritsteine, Tone, Lehme und Naturwerksteine. In Deutschland sind im Jahr 2016 mehr als 522 Mio. Tonnen Baumineralien abgebaut worden. Den größten Anteil mit mehr als 247 Mio. Tonnen sind abgebaute Bausande und Baukiese usw. Die größten Mengen von Baumineralien sind in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Bayern mit jeweils mehr als 100 Mio. Tonnen abgebaut worden. [4] Auf der anderen Seite entstehen mineralische Bauabfälle in Form von Bauschutt, Straßenaufbruch, Boden und Steine sowie weitere Baustellenabfälle. Die Erfassung von Bauabfällen auf Gipsbasis erfolgt separat. Im Jahr 2020 sind mineralische Bauabfälle einschließlich des Bodenmaterials in Höhe von 220,6 Mio. Tonnen angefallen. Dies macht die mengenmäßig größte Abfallgruppe aus. [5]

Geschossdecken bilden oftmals einen hohen Anteil der Gebäudekonstruktion und an daraus resultierenden Umweltwirkungen ab. Der Anteil der Deckenelemente beträgt bei Stahlbetonbauten ca. 45 – 55 Prozent der Gesamtbetonmasse. Insbesondere die Verwendung von Stahlbeton führt zu hohen CO₂-Belastungen im Bausektor.

[3] Deckenkonstruktionen können aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien hergestellt werden, die alle unterschiedliche Herstellungsverfahren bedingen. Die daraus resultierenden Umweltwirkungen sind ebenso verschieden. Darüber hinaus unterscheiden sich Deckensysteme hinsichtlich bautechnischer Aspekte wie Schallschutz, Wärmeschutz, Brandschutz und Statik. In dieser Untersuchung sind insbesondere die Stahlbetondecke, die Stahlbeton-Hohdielendecke, die Holzbalkendecke, die Brettstapeldecke, die Holz-Beton-Verbunddecke und die Ziegel-Einhängendecke gegenübergestellt worden. Dies sind unterschiedliche Konstruktionsmethoden gängiger Deckensysteme, die aufgrund ähnlicher bautechnischer Eigenschaften (Bauphysik etc.) gewählt wurden. Alle sind individuell und mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen verbunden. Die Eignung eines Deckensystems ist neben den oben genannten Faktoren u.a. von der vorgesehenen Nutzungs- bzw. Gebäudeart abhängig, woraus z. B. Anforderungen an die Spannweiten resultieren können.

2 Materialität und Potenziale

Die Materialien der untersuchten Deckensysteme unterscheiden sich hinsichtlich der Herstellungsprozesse, des natürlichen Vorkommens sowie weiterer Aspekte erheblich. Holz ist ein natürlicher Rohstoff, welcher im Bauwesen ökologische Vorteile gegenüber anderen Baustoffen vorweist. Die Herstellung technischer Rohstoffe erfolgt im Gegensatz zu Holz meist mittels fossiler Energieträger. Die Produktion von Holz erfolgt hingegen lediglich mit Sonnenenergie. Weiterhin entzieht es in der Wachstumsphase der Atmosphäre das schädliche Treibhausgas CO₂. Dieses bleibt wiederum in Form von Kohlenstoff in Holzprodukten über die gesamte Nutzungsdauer gebunden. Am Ende des gesamten Lebenszyklus wird die gespeicherte Menge abgegeben und von nachwachsenden Bäumen gespeichert. Somit ist es ein geschlossener, neutraler CO₂-Kreislauf. Aus den Ergebnissen der Ökobilanzierung geht hervor, dass für die Herstellung, Nutzung, Instandhaltung und Entsorgung von Holzprodukten weniger Energie benötigt wird, als aus dem Produkt und den Reststoffen der Herstellung erzeugt wird. In der heutigen Zeit wird der Baustoff Holz durch Architekten und Bauherren aufgrund seiner Nachhaltigkeitspotenziale insbesondere für die Tragkonstruktion häufiger gewählt. [6] Die Entwicklung wird unter anderem an der Anzahl genehmigter Wohngebäude deutlich (siehe Tabelle 1). Der Anteil von Konstruktionen, welche überwiegend aus Holz bestehen und über die Holznutzung in Dachstühlen hinausgehen, beträgt im Bundesdurchschnitt 21,3 Prozent. Die Bundesländer mit dem höchsten Waldanteil an der jeweiligen Landesfläche Rheinland-Pfalz und Hessen haben einen Durchschnitt von über 20 Prozent. Baden-Württemberg ist mit einem Durchschnitt von über 34 Prozent das Bundesland mit den prozentual meisten Genehmigungen im Wohnungsbau mit überwiegend verwendetem Baustoff Holz. Hamburg weist im bundesweiten Vergleich mit weniger als 7 Prozent den prozentual geringsten Wert auf. [7]

Tabelle 1 Quoten genehmigter Wohngebäude in Holzbauweise, Eigene Darstellung in Anlehnung an [7]

Jahr	2017	2018	2019	2020	2021
Holzbau	21.018	20.958	22.341	25.408	27.554
Gesamt	119.060	117.897	119.472	124.548	129.363
Quote [%]	17,60	17,80	18,70	20,40	21,30

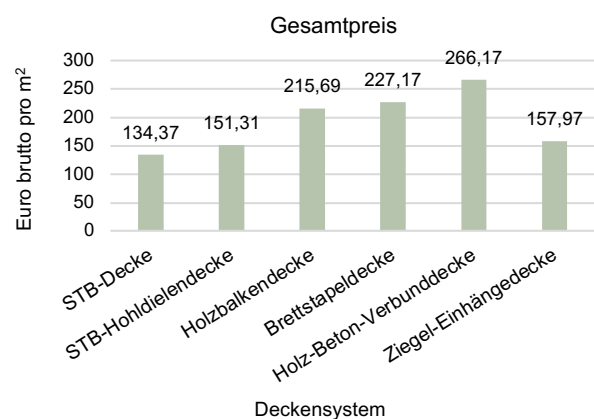
Weitere Vorteile des Baustoffs sind eine geringe Verarbeitungsdauer und ein hoher Vorfertigungsgrad. Neben den ökologischen Aspekten ist Holz ein Naturprodukt, das dem Menschen das Gefühl vermittelt, der Natur nahe zu sein. Dadurch wird die Behaglichkeit und somit das Wohlbefinden des Menschen im Raum erhöht. [8]

Stahlbeton besteht aus den Komponenten Stahl und Beton und hat, trotz der natürlichen Ausgangsstoffe, im Vergleich zum Baustoff Holz deutlich höhere Umweltwirkungen. Beton entsteht aus der Mischung von Zement, Wasser, Sand und Kies. Die mit Abstand größten Umweltwirkungen resultieren aus der Herstellung der Komponente Zement. Mehr als 98 Prozent der gesamten CO₂-Emissionen des Betons sind auf die Zementindustrie zurückzuführen. Insgesamt verursacht die Zementherstellung zwei Prozent der deutschen Treibhausgasemissionen und acht Prozent der globalen Treibhausgasemissionen. Diese ergeben sich insbesondere aus dem Brennvorgang, bei welchem das Ausgangsmaterial Kalkstein zu (Zement-)Klinker gebrannt wird. [9] Die Art der verwendeten Brennstoffe hat lediglich einen geringen Einfluss auf die CO₂-Bilanz. Vielmehr muss der im Kalkstein gebundene Kohlenstoff, welcher als CO₂ freigesetzt wird, reduziert werden. Aktuelle Forschungsprojekte zeigen, dass die Herstellung von Zement in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte optimiert werden kann. Altbeton kann als Recyclingprodukt weiterverwendet werden. Jedoch verbessert der Recyclingprozess die CO₂-Bilanz des Betons nicht wesentlich. [10] Der Bewehrungsstahl hingegen wird bereits in Europa meist recycelt. [11] Auch wenn die Menge der zur Herstellung benötigten Ressourcen reduziert wird, handelt es sich bei den Ausgangsstoffen um nicht nachwachsende Rohstoffe. Demzufolge ist das Vorkommen der Ressourcen, abgesehen von der klimaschädlichen Verarbeitung, im direkten Vergleich zum Baustoff Holz endlich. [8] Stahlbeton-Hohldeckendecken unterscheiden sich zu klassischen Stahlbetondecken darin, dass der Beton ausschließlich in den Bereichen eingesetzt wird, in denen er statisch erforderlich ist. Durch die Hohlräume werden sowohl das Gesamtgewicht des Gebäudes reduziert, als auch bis zu 50 Prozent weniger Beton benötigt. Der Anteil der benötigten Bewehrung kann um bis zu 70 Prozent reduziert werden. Diese Materialeinsparungen führen zu einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen und der erforderlichen Energie. Durch den Einsatz von Stahlbetonhohldeckendecken werden im Vergleich zu klassischen Stahlbetondecken im Durchschnitt rund 20 Prozent weniger CO₂ ausgestoßen und rund 20 Prozent weniger Energie benötigt. [12]

Das jahrhundertealte Herstellungsverfahren von Ziegeln ist ebenfalls mit einem hohen Energieaufwand verbunden. Die Ziegel werden aus Ton geformt, die Rohlinge getrocknet und danach bei hohen Temperaturen im Ofen gebrannt. Neue Verfahren sollen die thermische Effizienz um rund zehn Prozent steigern und den Gasverbrauch und CO₂-Ausstoß entsprechend reduzieren. Die Herkunft und der damit verbundene Transportaufwand haben neben weiteren Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die Ökobilanz von Baustoffen. Tonbaustoffe haben im Vergleich zu anderen Baustoffen oftmals geringere Transportwege. Aufgrund ihrer baubiologischen Eigenschaften schaffen Tonbaustoffe zudem ein hervorragendes Raumklima. Temperaturspitzen werden durch die Pufferung von Wärme ausgeglichen. Der Baustoff nimmt aufgrund der hohen Masse und hohen Tragfähigkeit bei Temperaturänderungen Wärme auf und gibt diese erst stark verzögert wieder ab. Decken und Wände aus Ton sind diffusionsoffen. Ziegel haben im Vergleich zu anderen Baustoffen eine hohe Langlebigkeit, Robustheit und einen geringen Wartungs- und Instandhaltungsaufwand. [13] Ziegelbruch kann ebenso als Recyclingprodukt als Füll- oder Schüttmaterial im Weg- und Tiefbau, als Zuschlagstoff bei Ziegelsplittbeton, beim Bau von Lärmschutzwällen und als Tenismehl verwendet werden. Ziegel eignen sich grundsätzlich für die Deponierung, da sie chemisch neutral und inert sind. Zusätzlich sind sie als Abfallprodukt für die Verfüllung von Gruben oder Steinbrüchen zugelassen. [14]

3 Kostenkennwerte

Die mit der Herstellung verbundenen Kosten sind oftmals neben Nachhaltigkeitsaspekten sowie technischen Anforderungen für die Wahl des Deckensystems entscheidend. Stahlbetonkonstruktionen haben für Spannweiten von ca. 4,4 m vergleichsweise die geringsten Herstellungskosten. Darauf folgt die Ziegel-Einhängendecke, die im Vergleich aller sechs Deckensysteme im mittleren Bereich hinsichtlich der Herstellungskosten liegt. Aufgrund der im Verhältnis hohen Holzpreise sind die Deckenkonstruktionen aus dem Baustoff Holz mit den höchsten Herstellungskosten verbunden. Die Gesamtpreise der verschiedenen Deckensysteme werden pro Quadratmeter in nachstehender Abbildung dargestellt.

**Bild 2** Gesamtpreise Deckensysteme

Zur Vergleichbarkeit basieren die Kostenkennwerte aller Deckenkonstruktionen auf derselben Oberflächenqualität (Qualitätsstufe Q2) in Bezug auf die Deckenunterseite. Die Kostenkennwerte der einzelnen Konstruktionen sind über „Baupreise.de“ ermittelt worden, wobei die Daten auf der Online-Datenbank von SIRADOS basieren. Eine Plausibilisierung der ermittelten, aufgezeigten Kostenkennwerte ist zusätzlich mit den Kennwerten des Baukosteninformationszentrums (BKI) der Ausgabe Baukosten Bauelemente (Stand: 2022) erfolgt. Im Allgemeinen sind Baupreise sehr volatil und von einigen Einflüssen abhängig. Dennoch sind deutliche Unterschiede, abhängig vom gewählten Material, erkennbar.

4 Methodik und Auswertung

Mittels ökologischer Betrachtung werden folgende Indikatoren untersucht, die zur Beurteilung verschiedener Umweltwirkungen dienen. Das Treibhauspotenzial spiegelt die aus den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen verbundenen Auswirkungen auf die Erdatmosphäre wider. Nach Angaben des deutschen Umweltbundesamtes steigt die globale Jahresmitteltemperatur seit Beginn des 20. Jahrhunderts um ca. 0,74 °C und seit 1950 um 0,13 Grad Celsius je Jahrzehnt an. Der größte Teil der Klimaerwärmung entsteht durch menschliche Aktivitäten und die damit verbundene Freisetzung von Treibhausgasen. [3] Mit der Bilanzierung ist auch das Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht betrachtet worden. Der Abbau der Ozonschicht resultiert aus anthropogenen Emissionen. Zu möglichen Auswirkungen zählen u.a. die Minderung der Ernteerträge (Störung der Photosynthese), Tumorindikationen (Hautkrebs und Augenerkrankungen), die Abnahme des Meeresplanktons etc. Das Versauerungspotenzial von Boden und Wasser ist ein weiterer Indikator. Die Verringerung des pH-Wertes von Regenwasser und Nebel führt unter anderem zu Schäden an Ökosystemen wie das Waldsterben. Metalle und Natursteine sind durch diesen Effekt zudem einer verstärkten Korrosion oder Zersetzung ausgesetzt. Jedoch handelt es sich bei diesem Indikator nicht um ein globales Problem. Unterschiedliche Pufferkapazitäten der Böden sind in einer Auswertung zu berücksichtigen. [15] Bei der Betrachtung des Primärenergiegehalts, welcher den benötigten Gesamtbedarf an energetischen Ressourcen zur Herstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung charakterisiert, ist zwischen erneuerbarem und nicht erneuerbarem Primärenergieinhalt zu unterscheiden. Der erneuerbare Primärenergieinhalt umfasst Wind- und Wasserkraft, Geothermie, Solarenergie sowie die in der Biomasse verfügbare Energie. [16] Der nicht erneuerbare Primärenergieinhalt beinhaltet hingegen den Einsatz der endlichen abiotischen energetischen Ressourcen Erdgas, Erdöl, Braunkohle, Steinkohle und Uran. [15] Das Eutrophierungspotenzial ist ein weiterer Indikator, welcher Bestandteil der ökologischen Betrachtung ist. Dieses beschreibt die Übersättigung eines Ökosystems mit essentiellen nicht organischen Nährstoffen wie Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die unter natürlichen Umständen lediglich in geringen

Konzentrationen auftreten. Die Folgen resultieren aus Luftschadstoffen, Abwässern sowie der Dünnung in der Landwirtschaft. Als Folge kann vermehrtes Algenwachstum auftreten. Außerdem haben eutrophierte Böden eine verstärkte Anfälligkeit gegenüber Krankheiten und Schädlingen und eine Schwächung des Festigkeitsgewebes. Jedoch ist ähnlich zum Versauerungspotenzial zu beachten, dass die Effekte regional sehr unterschiedlich ausfallen. [16] Durch die Bildung von Photooxidanzien in der unteren Troposphäre entsteht Ozon insbesondere in Städten sowie ihrer näheren Umgebung. Jedoch ist bodennahes Ozon im Gegensatz zu seiner Schutzfunktion in der Stratosphäre ein schädliches Spurengas und in höheren Konzentrationen humantoxisch. Das Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon ist ein weiterer Indikator der Untersuchung. [15]

Zur Beurteilung der Entsorgungseigenschaften von Bau- und Werkstoffen auf Gebäudeebene wird der Entsorgungsindikator je Deckensystem ermittelt. Der Wert beinhaltet den aktuellen Entsorgungsweg einer Bauteilkomponente bzw. das Verwertungspotenzial. [17] Ergänzend zum Entsorgungsindikator werden die sechs Deckensysteme anhand der Kriterien „Rückbau, Trennung, und Verwertung“ nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), Kriterien-Steckbrief 4.1.4, untersucht. Diese Untersuchung bezieht sich auch auf die Zeit nach der Nutzungsphase. Das Kriterium wird der Hauptkriteriengruppe „Technische Qualität“ und der Kriteriengruppe „Technische Ausführung“ zugeordnet. Das KrWG fordert die Schonung der natürlichen Ressourcen, Vermeidung von Abfällen, ordnungsgemäße und schadlose Verwertung unvermeidbarer Abfälle, sowie die gemeinwohlverträgliche Beseitigung nicht verwertbarer Abfälle bezogen auf den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Damit soll die Einsparung von Deponieraum, Rohstoffen und Produktionsenergie erreicht werden. Die Untersuchung der Rückbau- und Recyclingfähigkeit des Gebäudes erfolgt Anhand der vom BBSR zur Verfügung gestellten Excel-basierten Arbeitshilfe. Mit der Ermittlung des Recyclingfaktors, welcher sich aus den Bewertungspunkten für Rückbau, Sortenreinheit und Verwertung im Verhältnis 3 : 3 : 4 zusammensetzt, werden die sechs Deckensysteme bewertet und gegenübergestellt. Eine einfache Rückbaubarkeit und eine hohe Sortenreinheit führen somit theoretisch zur Aufwertung der Ergebnisse. Die einzelnen Bauteilschichten der sechs verschiedenen Schichten sind bewertet und anschließend durch Frau Hon. Prof. Dr.-Ing. Prof. Rosen plausibilisiert worden. [18] Abweichend zu den Vorgaben des BNB-Steckbriefs 4.1.4 ist die Bewertung unter Beachtung der Wiederverwendbarkeit und des notwendigen Energiebedarfs erfolgt. Die ökologische Untersuchung in Bezug auf die zuvor genannten Indikatoren, bis auf den Recyclingfaktor R, erfolgt anhand des Berechnungstools eco2soft.

Die Betrachtung erfolgt sowohl auf Gebäude- als auch Bauteilebene. Der erste Teil der Betrachtung basiert auf der Bilanzgrenze BG3. Die Bilanzgrenze umfasst die Herstellung, den Austausch sowie die Instandsetzung im

definierten Betrachtungszeitraum von 80 Jahren. Die Bilanzierung auf Gebäudeebene basiert auf einem Referenzgebäude, das mit rund 158 Quadratmetern BGF einem klassischen Einfamilienhaus oder einer kleineren Gewerbeeinheit entspricht. Im zweiten Teil der Bilanzierung erfolgt eine Plausibilisierung der Werte mit einem weiteren Berechnungstool zur Ökobilanzierung (eLCA). Damit eine Vergleichbarkeit der Daten erfolgen kann, muss die Bilanzgrenze beider Berechnungstools dieselben Lebenszyklusphasen beinhalten. Zur Vergleichbarkeit ist die Bilanzgrenze BG1 nach eco2soft gewählt worden. Diese entspricht nach DIN EN 15978:2012-10 den Modulen A1-A3, an welchen sich eLCA orientiert. In Bezug auf die Lebenszyklusphase geht es hierbei um die Herstellungsphase. Die Module sowie die in diesem Zusammenhang stehenden Bilanzgrenzen gem. IBO sind in der nachstehenden Grafik abgebildet:

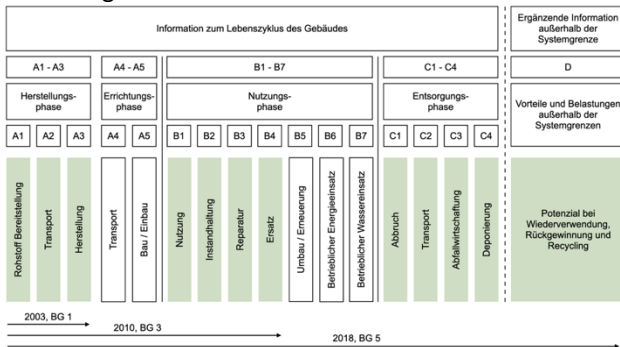


Bild 3 Bilanzgrenzen, in Anlehnung an DIN EN 15804, eLCA und eco2soft [19]

Die Plausibilisierung dient nicht dazu, übereinstimmende Werte zu erhalten. Vielmehr soll die Aussagekraft in Bezug auf die Rangfolge der ermittelten Werte der verschiedenen Deckensysteme gestärkt werden. Zur Vergleichbarkeit der Deckensysteme ist vorab eine Vordimensionierung für jedes System auf Grundlage der mit dem Referenzgebäude definierten Spannweite von rund 4,4 m erfolgt. Mit der Vordimensionierung sind die einwirkenden Lasten, welche sich in ständige sowie veränderliche Einwirkungen unterscheiden, und die entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt worden. Die Ergebnisse der einzelnen Vorbemessungen zeigen bereits, dass die Deckenaufbauten in Bezug auf die Schichtdicke voneinander abweichen. Dickere Schichten haben bei gleicher Geschosshöhe unter anderem zur Folge, dass mehr Material für die Außenwände bzw. die Fassadenkonstruktion benötigt wird. Daraus folgen wiederum bei gleichem Material ein höherer Ressourcenverbrauch, ein höherer Energieaufwand und größere Umweltwirkungen. Die Deckensysteme unterscheiden sich sowohl in der Herstellungsphase hinsichtlich der eingesetzten Materialien als auch in der Nutzungsphase. Die sechs verschiedenen Deckenaufbauten sind nachstehend dargestellt.

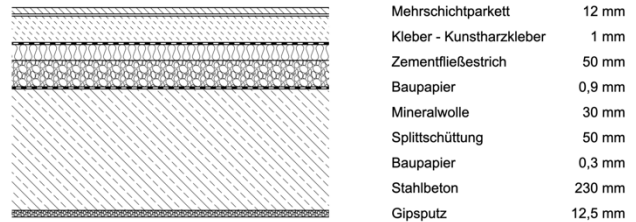


Bild 4 Detail Deckenaufbau Stahlbetondecke (maßstabslos)

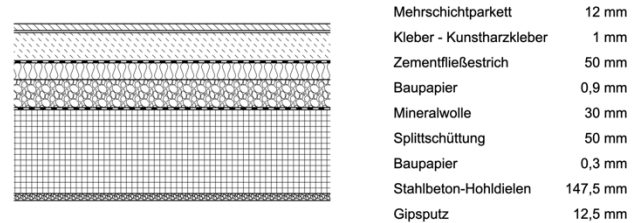


Bild 5 Detail Deckenaufbau Stahlbeton-Hohldielendecke (maßstabslos)

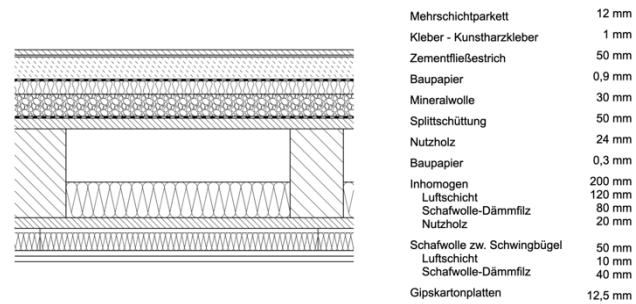


Bild 6 Detail Deckenaufbau Holzbalkendecke (maßstabslos)

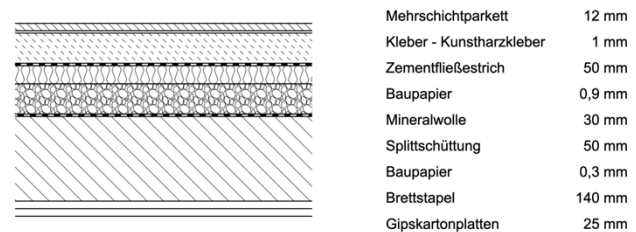


Bild 7 Detail Deckenaufbau Brettstapeldecke (maßstabslos)

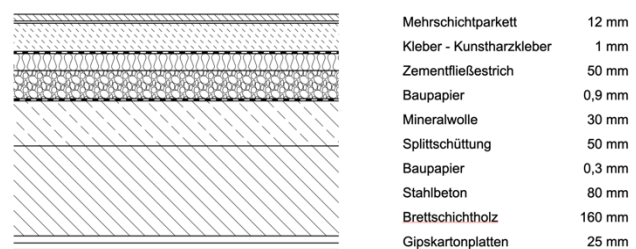


Bild 8 Detail Deckenaufbau Holz-Beton-Verbunddecke (maßstabslos)

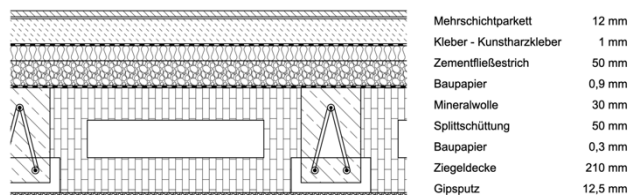


Bild 9 Detail Deckenaufbau Ziegel-Einhängendecke (maßstabslos)

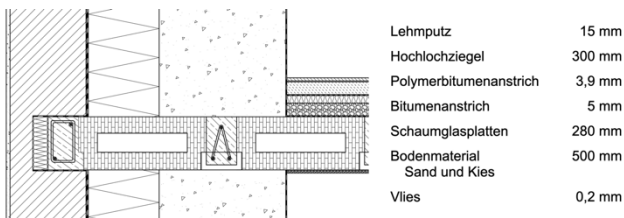


Bild 10 Detail Auflager Ziegel-Einhängedecke (maßstablos)

In Bezug auf die Auswertung des Indikators GWPT wird deutlich, dass die Werte der Stahlbetondecke, Stahlbeton-Hohldieleendecke sowie der Ziegel-Einhängedecke wesentlich höher als die der Holzbalkendecke, Brettstapeldecke sowie Holz-Beton-Verbunddecke sind. Die Werte der Stahlbetondecke sind auf Gebäudeebene (Referenzgebäude) für einen Betrachtungszeitraum i. H. v. 80 Jahren um rund 55 Prozent höher als die der Brettstapeldecke. Diese werden in nachstehender Tabelle abgebildet.

Tabelle 2 Indikatoren GWPT, GWPB, GWPF, Software: eco2soft

Deckensystem	GWPT [kg CO ₂ -Äq.]	GWPF [kg CO ₂ -Äq.]	GWPB [kg CO ₂ -Äq.]
STB-Decke	445,6	636,0	-190,4
STB-Hohldieleendecke	403,2	593,6	-190,4
Holzbalkendecke	326,4	586,4	-260,8
Brettstapeldecke	286,4	576,8	-290,4
Holz-Beton-Verbunddecke	300,8	617,6	-316,0
Ziegel-Einhängedecke	409,6	600	-190,4

BG3, Gebäudeebene, Betrachtungszeitraum: 80 Jahre

Die Abweichungen resultieren insbesondere aus den Differenzen des Indikators Globales Erwärmungspotenzialtotal-biogen (GWPB). Der spiegelt die während des Wachstums von Biomasse aus der Atmosphäre aufgenommene und über die Lebensdauer des Materials gebundene Menge an CO₂ sowie biogene Emissionen in der Luft durch Oxidation oder Zerfall von Biomasse (z. B. Verbrennung) wider. Bei Holzkonstruktionen ist der Indikator GWPB hinsichtlich der Wachstumsphase deutlich geringer. Dies ist mit der Wachstumsphase von Bäumen verbunden, in der CO₂ aus der Atmosphäre entzogen und bis zum Lebenszyklusende gespeichert wird. Die Werte des Globalen Erwärmungspotenzials-fossil (GWPF) sind analog zu den Werten des GWPB ebenfalls höher. Daraus ergibt sich ein hoher Unterschied der einzelnen Deckensysteme beim Indikator GWPT, der Summe aus GWPB und GWPF. Das Ergebnis wird unter anderem mit der Herstellung von Zement, der für Stahlbetondecken essenziell ist, begründet. Bei diesem Herstellungsprozess werden große Mengen von Treibhausgasemissionen ausgestoßen. Die vergleichsweise höheren Werte der Ziegel-Einhängedecke sind auf den Herstellungsprozess der Ziegel zurückzuführen. Der Brennvorgang ist auch mit einem höheren Anteil von Treibhausgasemissionen verbunden. Die Auswertung des Indikators PERT zeigt deutlich, dass die Werte der Holzkonstruktionen von denen der weiteren Deckensystemen deutlich abweichen. Insgesamt sind die Differenzen insbesondere auf

den Indikator PERM, der den Anteil der stofflich genutzten Ressourcen abbildet, zurückzuführen. Die höheren Werte der Holzkonstruktionen werden mit dem im Material enthaltenen Heizwert des nachwachsenden Rohstoffes begründet. Aufgrund der vergleichsweise hohen Werte der nicht erneuerbaren Primärenergie für den Kubikmeter trockenes Holz in der Ökobilanzdatenbank fällt der Unterschied zwischen den einzelnen Deckensystemen bei diesem Indikator geringer aus. [15] Die Auswertung des Indikators AP ergibt, dass die reinen Holzkonstruktionen geringere Werte als die klassische Stahlbetondecke und die Holz-Beton-Verbunddecke aufweisen. Aufgrund der vergleichsweise geringeren Materialmenge, die für die Stahlbeton-Hohldieleendecke benötigt wird, ist der Wert dieser Konstruktion geringer als der Wert der klassischen Stahlbetondecke. Dieser Effekt wird bei weiteren Indikatoren wie GWPT und PENRT bestätigt. Weitere detaillierte Werte werden im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht abgebildet, da diese aufgrund verschiedener Hersteller, verwendeten Zusatzstoffen, etc. deutlich voneinander abweichen können. Jedoch unterstreicht die Gegenüberstellung der Werte beider Berechnungstools, dass die Werte der Holzkonstruktionen meist von den Werten der mineralischen Primärkonstruktionen abweichen. Auch wenn die Höhe der Ergebnisse beider Berechnungstools voneinander abweichen, ist die Rangfolge bei den Indikatoren GWPT und PERT dieselbe. Das Ergebnis stärkt die Aussagekraft vorangegangener Analysen. Die Differenz der Werte ist auf die verschiedenen Datenbanken, auf denen die Berechnungen beider Berechnungstools basieren, zurückzuführen. Der Anteil von Treibhausgasemissionen, der durch die Geschossdecken verursacht wird, ist im Verhältnis zu den gesamten Treibhausgasemissionen des Referenzgebäudes bei Holzkonstruktionen wesentlich geringer. Dieser beträgt weniger als 20 Prozent der Treibhausgasemissionen aller Konstruktionen. Bei Stahlbetondecken beträgt der Anteil im Vergleich rund 60 Prozent (siehe Bild 11). Somit wird deutlich, dass der Anteil an den Gesamtemissionen eines Gebäudes sehr stark vom gewählten Deckensystem abhängt. Für diese Analyse liegt das Berechnungstool eco2soft, BG3 und ein Betrachtungszeitraum i. H. v. 80 Jahren zugrunde.

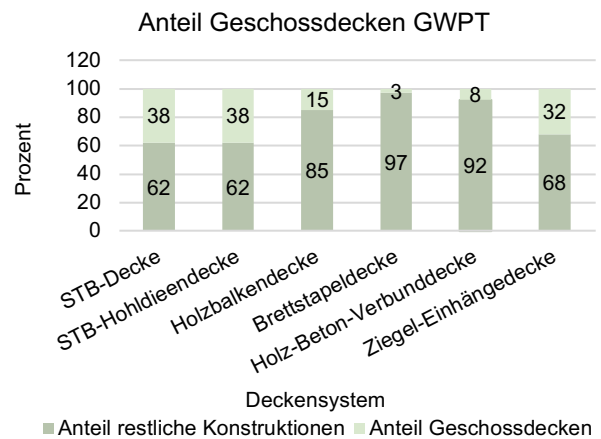


Bild 11 Anteil Geschossdecken an Gebäude-Gesamtbilanz, Indikator GWPT

Die Auswertung des Entsorgungsindikators zeigt, dass insbesondere die Deckensysteme aus mineralischen Baustoffen, wie die Stahlbetondecke und die Ziegel-Einhängedecke, einen vergleichsweise höheren Entsorgungsindikator haben. Nach Angaben der Datenbank, auf denen die Berechnung basiert, sind Stahlbeton-Hohldielen hinsichtlich des Verwertungspotenzials positiver als die Ortbetonkonstruktion bewertet. Der vergleichsweise hohe Wert der Holzbalkendecke ist mit der Vielzahl einzelner Komponenten sowie dem hohen Anteil des Schafwolle-Dämmfilzes begründet, der nach den Werten der Datenbank eine relativ schlechte Bewertung bezüglich der Entsorgungseinstufung sowie des Verwertungspotenzials erhält. Die Deckensysteme mit einem sehr hohen Anteil des Baustoffs Holz, also die Brettstapeldecke und die Holz-Beton-Verbunddecke, haben die geringsten bzw. in ökologischer Perspektive positivsten Werte.

Grundsätzlich sieht der BNB-Steckbrief 4.1.4 eine ganzheitliche Betrachtung des Gebäudes und somit die Berechnung des Recyclingfaktors R auf Gebäudeebene vor. Die Berechnung des Recyclingfaktors R erfolgt in dieser Untersuchung auf Bauteilebene. Die sechs Deckensysteme sind vorbewertet und durch Hon. Prof. Dr.-Ing. Anja Rosen plausibilisiert worden. Die Bewertung der Kriterien erfolgt abweichend zu den Vorgaben des BNB-Kriteriensteckbriefs 4.1.4 unter Beachtung der Wiederverwendbarkeit. Zudem wird der notwendige Energieaufwand insbesondere bei dem Kriterium „Rückbau“ in der nachstehenden Einstufung mitberücksichtigt.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Bewertung sowie der daraus resultierende Recyclingfaktor R je Deckensystem abgebildet.

Tabelle 3 Bewertung Recyclingfaktor R nach BNB-Steckbrief 4.1.4 [20]

Deckensystem	Rückbau	Trennung	Verwertung	R-Faktor
Stahlbetondecke	-	o	o	4,25
Stahlbeton-Hohldielendecke	+	o	+	6,75
Holzbalkendecke	-	-	+	4,50
Brettstapeldecke	+	-	++	7,00
Holz-Beton-Verbunddecke	-	--	o	2,75
Ziegel-Einhängedecke	-	-	o	3,50
Bewertung der Eignung	++	Sehr günstig		
	+	Günstig		
	o	Durchschnittlich		
	-	Ungünstig		
	--	Sehr Ungünstig		

Die Auswertung des Recyclingfaktors R ergibt, dass die Brettstapeldecke gemäß dem Rückbau, der Trennung und der Verwertung insgesamt die ökologisch positivste Bewertung erhält. Darauf folgt mit einem geringen Abstand die Stahlbeton-Hohldielendecke. Die weiteren Deckensysteme folgen mit einem größeren Abstand.

Mit der Bewertung der Kriterien Rückbau, Trennung und Verwertung je Deckensystem ist deutlich geworden, dass die Einstufung stark von der zuvor definierten

Konstruktion abhängt. Bereits die Optimierung einzelner Komponenten würden die Ergebnisse und die Gesamtauswertung bedeutsam beeinflussen. Eine Abweichung der Rangfolge in Bezug auf die Auswertung des Entsorgungsindikators sowie des Recyclingfaktors ist im Wesentlichen auf zwei Aspekte zu erschließen. Der Entsorgungsindikator setzt sich aus der Bewertung jedes einzelnen Materials zusammen, ohne den Verbund angrenzender Schichten zu berücksichtigen. Beim Recyclingfaktor R ist hingegen das Bauteil „Decke“ als ganzheitliches zu bewertendes Element zu betrachten. Zudem werden gegenwärtig die beiden Kriterien Rückbau und Trennung separat bewertet, die das Ergebnis wesentlich beeinflussen. Jedoch basiert die Ermittlung des Entsorgungsindikators primär auf der Entsorgungseinstufung und dem Verwertungspotenzial. Somit weichen die Schwerpunkte der beiden Indikatoren voneinander ab, was wiederum zu unterschiedlichen Ergebnissen und einer abweichenden Rangfolge führt.

5 Wege zum nachhaltigeren Bauen

Die Lebensdauer von Bauwerken lässt sich anhand von planerischen Maßnahmen beeinflussen. Grundsätzlich ist eine längere Lebensdauer, sofern keine schädlichen Schadstoffe freigesetzt werden, ökologischer. Durch eine flexible Planung können Gebäude bei Nutzungsänderungen an neue Anforderungen angepasst werden. Bauteile, die verschiedene Lebensdauern ausweisen, sind konstruktiv voneinander zu trennen, sodass mit einem Austausch keine Beschädigung von Bauteilen mit längerer Lebensdauer einhergeht. Bauteile, die aufgrund ihrer Lebensdauer häufiger ausgetauscht werden müssen, sind möglichst recyclingfähig einzusetzen. Bei der Planung von Bauteilkonstruktionen ist darauf zu achten, dass der Abfallanteil und der Aufwand zum Austausch von Baustoffen minimiert werden. In diesem Zusammenhang ist die Planung homogener Bauteilaufbauten oder leicht trennbarer Kombinationen vorteilhaft und zu bevorzugen. Mit der Standardisierung von Elementen, Bauteilen und Baugruppen mit gleicher Funktion in Aufbau, Maßen und Werkstoffen können diese nach der Demontage einfacher sortiert und für eine Wiederverwendung verwendet werden. [21] Die Nutzung von Abwärme industrieller Unternehmen für Nichtwohngebäude sowie Wohngebäude würde positiv zum Klima- und Umweltschutz beitragen und zusätzlich die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens erhöhen. Die energetische Modernisierung des Gebäudestandards ist ein weiteres Ressourcenpotenzial. Durch die Sanierung der Gebäudehülle mittels ressourcenschonender Dämmstoffe kann der Energieverbrauch in der Nutzungsphase langfristig gesenkt werden. Zudem lassen sich bereits in der Phase der Dämmstoffherstellung der Energiebedarf sowie CO₂-Emissionen nachhaltig reduzieren. [22] Im Durchschnitt sind mehr als 50 Prozent der Treibhausgasemissionen eines Gebäudes auf die Rohstoffgewinnung, Herstellung, Transport, Wartung, Abriss und Entsorgung zurückzuführen. Hierdurch wird die Relevanz der Gebäudekonstruktion, die neben der Energieeffizienz für einen hohen Anteil der Treibhausgasemissionen

verantwortlich ist, deutlich. Kreislaufgerechtes Bauen schöpft die Potenziale eingesetzter Ressourcen über die Nutzungsphase hinaus aus. Das Konzept sieht vor, dass Baumaßnahmen derartig entworfen, geplant und realisiert werden, dass möglichst alle Materialien am Lebenszyklusende hochwertig rezyklierbar oder wiederverwendbar sind. Mit Urban Mining werden die Abfallmenge und der Primärrohstoffbedarf reduziert und Sekundärrohstoffe aus langlebigen Gütern sowie Ablagerungen gewonnen. Urban Mining beschäftigt sich hauptsächlich mit dem Materialbestand und versucht, frühzeitig zukünftige Stoffströme zu prognostizieren. Hierzu ist wieder einmal die Betrachtung des gesamten Zyklus erforderlich. Anhand des digitalen Gebäuderessourcenpasses werden alle lebenszyklusrelevanten Gebäudeinformationen dokumentiert. [23] Die Modulbauweise ist in Bezug auf Ressourceneffizienz mit Vorteilen verbunden. Eine Umnutzung und Erweiterung von Modulbauten ist mit geringem Aufwand möglich. Daher haben sie grundsätzlich eine hohe Flexibilität. Außerdem sind ein unkomplizierter Abbau und eine Wiederverwertung an einem neuen Standort realisierbar. Es können die einzelnen Module ganzheitlich rückgebaut, sortenrein getrennt und die Materialien recycelt werden. [24]

Geschossdecken sind innenliegende Bauteile, die meist von beheizten Räumen umgeben sind. Grundsätzlich haben diese Bauteile einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Energiebedarf des Gebäudes. Der Einfluss auf den Energiebedarf ist von der Anzahl der Nutzungseinheiten, die ein unterschiedliches Heizverhalten aufweisen, abhängig. Eine große Speicherfähigkeit, wie die Ziegel-Einhängendecke, sind dennoch von Vorteil. Somit kann Wärme oder Kälte gespeichert und bei Bedarf wieder abgegeben werden. Dennoch haben Geschossdecken einen geringen Einfluss auf die Erreichung von KfW-Standards, Passivhaus-Standards, o. Ä.

6 Zusammenfassung

Die Auswertung des Indikators GWPT hat ergeben, dass die Emissionswerte der mineralischen Primärkonstruktionen wesentlich höher als die der Holzbalkendecke, Brettstapeldecke sowie Holz- Beton-Verbunddecke sind. Auf Gebäudeebene sind die Werte der Stahlbetondecke (Referenzgebäude) für einen Betrachtungszeitraum i. H. v. 80 Jahren um rund 55 Prozent höher als die der Brettstapeldecke. Die Abweichungen resultieren insbesondere aus den Differenzen des Indikators GWPB. Dieser spiegelt die während des Wachstums von Biomasse aus der Atmosphäre aufgenommene und über die Lebensdauer des Materials gebundene Menge an CO₂ sowie biogene Emissionen in der Luft durch Oxidation oder Zerfall von Biomasse (z. B. Verbrennung) wider. [4] Dieser ist bei Holzkonstruktionen hinsichtlich der Wachstumsphase deutlich geringer. In dieser Phase wird CO₂ aus der Atmosphäre entzogen und bis zum Lebenszyklusende gespeichert. Der größte Klimanutzen ist die Kaskadennutzung des Holzes, wobei die energetische Nutzung erst nach der stofflichen erfolgt. Hier handelt es sich um einen geschlossenen

neutralen CO₂-Kreislauf. [5] Die hohen Werte der mineralischen Deckenkonstruktionen sind insbesondere auf die Herstellungsverfahren (Zementherstellung, Brennvorgang Ziegel etc.) zurückzuführen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass Nachhaltigkeitsaspekte und Effizienzpotenziale in Bezug auf Deckenkonstruktionen von einer Vielzahl von Faktoren abhängen. Ein Gebäude muss als ganzheitliches Element über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden. Abgesehen von den Umweltwirkungen, die auf einzelne Bauteile zurückzuführen sind, müssen die Auswirkungen auf die Dimensionierung weiterer Bauteile im Planungsprozess mitberücksichtigt werden. Dies hat Auswirkungen auf die ökologische Gesamtbilanz eines Gebäudes. Eine Bilanzierung ist auf Basis der für diese Untersuchung verwendeten Berechnungstools eco2soft und eLCA zielführend.

In dieser Untersuchung wurden einige Nachhaltigkeitsaspekte und Effizienzpotenziale in Bezug auf sechs unterschiedliche Deckensysteme dargestellt, sowie weitere in diesem Zusammenhang zu berücksichtigende Faktoren aufgezeigt. Hieraus resultieren unter anderem folgende offene Fragen und Forschungsbedarf für:

- **Nachhaltige Forstwirtschaft und ihre Grenzen** in Bezug auf die steigende Nachfrage des Rohstoffs Holz
- Die **Entwicklung und Implementierung innovativer und nachhaltiger Herstellungsprozesse** insbesondere in Hinsicht auf jahrhundertalte klimaschädliche Produktionsverfahren. Bei der Untersuchung sollte der Einfluss auf das Erreichen der Klimaschutzziele im Vordergrund stehen
- Die **Gegenüberstellung** von Nachhaltigkeitsaspekten und Effizienzpotenzialen **seriell sowie konventionell gefertigter Deckenkonstruktionen**
- Die **Wiederverwendbarkeit und Potenziale von Bestands-Deckensystemen**. Definition von Faktoren, die maßgeblich über die Wiederverwendbarkeit eines Bestand-Deckensystems entscheiden
- Die Untersuchung und Definition von Potenzialen in Bezug auf **Naturmaterialien, die vor Jahrhunderten zum Einsatz** kamen. Beurteilung, inwiefern der reaktivierte Einsatz unter Beachtung **neuer Material- und Herstellungskennnisse** zur Herstellung von Deckensystemen geeignet ist
- Die Untersuchung von **Nachhaltigkeitsaspekten und Effizienzpotenzialen mit Berücksichtigung der technischen Gebäudeausrüstung und der Materialentsorgung** und damit einhergehende Umweltwirkungen
- Die **Ökologische Betrachtung** von herkömmlichen Deckensystemen, die insbesondere **hinsichtlich der Lebenszyklusphasen Rückbau, Trennung, und Verwertung in ihrer Konstruktionsweise optimiert wurden**

7 Literatur

- [1] B. Weller, M.-S. Fahrion, S. Horn, T. Naumann und J. Nikolowski, Baukonstruktion im Klimawandel, Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016.
- [2] O. Huber, „ARDalpha,“ 28 10 2021. [Online]. Available: <https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/klimawandel/bauen-klima- oekologisch-emission-nachhaltig-100.html>. [Zugriff am 01 2023].
- [3] S. El khouli, M. Zeumer und V. John, Nachhaltig konstruieren, Freiburg: fgb freiburger graphische betriebe GmbH & Co. KG., 2014.
- [4] Umwelt Bundesamt, „Umwelt Bundesamt,“ 02 01 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/bauen-wohnen/wirkungen-bauen/rohstoffentnahme-bauen/welche-menge-an-rohstoffen-braucht-die- bauindustrie>. [Zugriff am 05 01 2023].
- [5] Umwelt Bundesamt, „Umwelt Bundesamt,“ 27 07 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#verwertung-von-bau-und-abbruchabfallen>. [Zugriff am 26 08 2023].
- [6] Forstwirtschaft in Deutschland, „Forstwirtschaft Deutschland,“ [Online]. Available: <https://www.forstwirtschaft-in-deutschland.de/forstwirtschaft/produkte-leistungen/holz/>. [Zugriff am 02 2023].
- [7] Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V., „Lagebericht 2022,“ 05 2022. [Online]. Available: https://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user_upload/eingebundene_Downloads/Lagebericht_2022.pdf. [Zugriff am 02 2023].
- [8] A. Kovacs, „Ramboll,“ 11 08 2021. [Online]. Available: <https://de.ramboll.com/media/rde/holzstatt-zement>. [Zugriff am 02 2023].
- [9] World Wide Fund For Nature, „Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie,“ Berlin, 2019.
- [10] K. Urban, „Schrot & Korn,“ 27 05 2021. [Online]. Available: <https://schrotundkorn.de/umwelt/warum-beton-die-klimakrise-zementiert>. [Zugriff am 02 2023].
- [11] Elbers, U., „nbau – Nachhaltig Bauen,“ 12 10 2022. [Online]. Available: <https://www.nbau.org/2022/10/12/ressourcenschonendes-bauen/>. [Zugriff am 02 2023].
- [12] Bauen aktuell, „Bauen aktuell,“ 29 07 2022. [Online]. Available: <https://www.bauen-aktuell.eu/deckensysteme-so-laesst-sich-der-oekologische-fussabdruck-von-gebaeuden-minimieren/>. [Zugriff am 02 2023].
- [13] Lebensraum Ziegel, „Mit Ziegeln das Klima schützen,“ [Online]. Available: https://ziegel.de/sites/default/files/2020-04/LRZ_Broschuere_Klima-Schuetzen%5B9596%5D.pdf. [Zugriff am 02 2023].
- [14] mein ziegelhaus, „Nachhaltiges Bauen mit Ziegeln,“ [Online]. Available: https://www.luecking.de/wp-content/uploads/2020/07/mz-nachhaltigkeit_2015.pdf. [Zugriff am 02 2023].
- [15] H. König, N. Kohler, J. Kreißig und T. Lützkendorf, Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung, Bd. 1, Regensburg, Bayern: Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2009.
- [16] baubook Rechner für Bauteile, „baubook Rechner für Bauteile,“ 07 01 2023. [Online]. Available: <https://www.baubook.at/BTR/?SW=5&LU=1823787131&qj=1&LP=xThlw>. [Zugriff am 01 2023].
- [17] IBO Ökologisch Bauen Gesund Wohnen, „IBO Ökologisch Bauen Gesund Wohnen,“ 13 01 2023. [Online]. Available: <https://www.ibo.at/materialoekologie/lebenszyklusanalysen/ei-entsorgungsindikator>. [Zugriff am 02 2023].
- [18] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „BNB-Steckbrief 4.1.4.“
- [19] IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, „Leitfaden zur Berechnung des Oekoindex OI3 für Bauteile und Gebäude,“ IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Wien, 2018.
- [20] E. D. i. A. a. d. v. B. z. V. g. E.-b. Arbeitshilfe.
- [21] S. Friedrichsen, Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen, Springer- Verlag GmbH.
- [22] Zentrum Ressourceneffizienz – Verein Deutscher Ingenieure e.V., „Zentrum Ressourceneffizienz – Verein Deutscher Ingenieure e.V.,“ [Online]. Available: <https://www.ressourcendeutschland.de/themen/bauwesen/ressourcenverbrauch-im-bauwesen/>. [Zugriff am 02 2023].
- [23] Zentrum Ressourceneffizienz – Verein Deutscher Ingenieure e.V., „Zentrum Ressourceneffizienz – Verein Deutscher Ingenieure e.V.,“ [Online]. Available: <https://www.ressourcendeutschland.de/themen/bauwesen/kreislaufgerichtetes-bauen/>. [Zugriff am 02 2023].
- [24] Baunetz_Wissen, „Baunetz_Wissen,“ [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/fachwissen/konstruktionen-elemente/modulbauweise-8030140>. [Zugriff am 02 2023].

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
D U I S B U R G
E S S E N

Offen im Denken

ub

universitäts
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/79167

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20231017-163445-1

In: Tagungsband zum 32. BBB-Assistent:innentreffen 2023: 04.10.2023 - 06.10.2023,
Universität Duisburg-Essen.

Alle Rechte vorbehalten.