

Ökobilanzierung von Lebensende-Optionen

Szenarien im bauphysikalischen Kontext am Beispiel
segmentierter Holzschalenkonstruktionen

Rafael Horn
Abel Groenewolt
Oliver David Krieg
Johannes Gantner

*Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis
zum 80. Geburtstag gewidmet*



Rafael Horn
Abel Groenewolt
Oliver David Krieg
Johannes Gantner

Ökobilanzierung von Lebensende-Optionen

Szenarien im bauphysikalischen Kontext am Beispiel segmentierter Holzschalenkonstruktionen

Die Betrachtung temporärer, modularer Bauwerke aus biobasierenden Rohstoffen wie Holz stellt bisher für die Ökobilanzierung eine methodische Herausforderung dar. Durch die Integration probabilistischer und dynamischer Elemente konnte eine Methode entwickelt werden, die belastbare Ökobilanzergebnisse unter Berücksichtigung unsicherer Lebensende-Szenarien und verknüpfter Lebenszyklen ermöglicht. Die Methode wurde am Fallbeispiel einer temporären Leichtbauschalenkonstruktion auf Basis eines modularen Holzbausystems angewendet. Zur Analyse der potenziellen Umweltwirkungen wurde hier beispielhaft das Treibhauspotenzial (GWP – Global Warming Potential) im Rahmen einer Monte-Carlo-Analyse unter Berücksichtigung der Unsicherheiten zukünftiger Nutzung untersucht. Dabei ergeben sich klare Vorteile bei einer hohen Anzahl an Umnutzungen gegenüber einer entsprechend hohen Zahl an Neubauten. Darüber hinaus kann gezeigt werden, dass die potenziellen Umweltwirkungen der Konstruktion mit einer Wahrscheinlichkeit von 87 % kleiner als 0,8 kg CO₂-Äquivalente je m² Nettogrundfläche und Jahr liegen.

Stichworte: Wiederverwendung; Kaskadennutzung; dynamische Ökobilanzierung; temporäre Gebäude; Holzschalen; Computerbasiertes Entwerfen; Wahrscheinlichkeitsbasierte Ökobilanzierung, Allokation; Unsicherheit

1 Einleitung und Problemstellung

Städte und Kommunen in Deutschland stehen bereits heute und zukünftig vor einer Vielzahl von Herausforderungen. Aufgrund des anhaltenden Trends der Urbanisierung und damit verbundener steigender Mieten und Wohnraumverknappung in Städten müssen jährlich ca. 350.000 neue Wohnungen geschaffen werden [1]. Dieses Ziel wird momentan mit einer Neubaurate von ca. 240.000 Wohnungen bei weitem nicht erreicht. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und führen insbesondere in ihrem Zusammenspiel zu Herausforderungen. Ein grundsätzliches Problem sind die Verfügbarkeit innerstädtischer Grundstücke sowie deren hohe Kosten [2]. Einen Ausweg hierbei könnte die städtische Nachverdichtung durch Aufstockung und Erweiterung bieten. Potenzial bietet sich an dieser Stelle für Leichtbauweisen, die geringe Lasten in das bestehende Gebäude einbringen und an die statische und geometrische Bestandssituation anpassbar sind. Eine nach-

Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of end-of-life options for cascade use – Scenarios in the building physics context using the example of lightweight timber constructions

The consideration of temporary, modular buildings based on bio-based materials such as wood has so far posed a methodological challenge for life cycle assessment. Based on the integration of probabilistic and dynamic elements, a method could be developed that enables reliable life cycle assessment results taking into account uncertain end-of-life scenarios and linked lifecycles. The method was applied to the case study of a temporary lightweight shell construction based on a modular timber construction system. The potential environmental impacts were analyzed using the example of GWP as part of a Monte Carlo analysis taking into account the uncertainties of future use. There are clear advantages with a high number of conversions compared to a correspondingly high number of new buildings. Furthermore, it could be shown that the potential environmental impacts of the construction are less than 0.8 kg CO₂-equivalents per m² net floor area and year with a probability of 87 %.

Keywords: reuse; cascading use; dynamic LCA, temporary buildings; timber shells; computational design; probabilistic LCA; allocation; uncertainty

trägliche Erweiterung könnte somit kostengünstig umgesetzt und zusätzlicher Wohnraum geschaffen werden.

Eine weitere Herausforderung ist der weltweite Ressourcenbedarf, der schon jetzt die natürliche Regenerationsfähigkeit unserer Umwelt um ein Vielfaches übersteigt und stetig weiter zunimmt [3, 4]. Das Bauwesen zählt dabei zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftszweigen in Europa, der mit seinen Gebäuden für rund 40% des Primärenergiebedarfs und rund 33% der Treibhausgasemissionen verantwortlich ist [5]. Um diesem Trend entgegenzuwirken, müssen zukünftige Bauwerke nicht nur hinsichtlich ihres Energiebedarfs optimiert werden. Es sind Werkstoffe und Tragsysteme zu entwickeln, welche den Anforderungen an Tragfähigkeit, Eigengewicht, Wiederverwendbarkeit und Umweltwirkung gewachsen sind. Besonderes Augenmerk wird hierbei zukünftig auf den verwendeten Baumaterialien und der Wieder- bzw. Weiterverwendung liegen. Insbesondere erzeugt das Schaffen von neuem Wohnraum in innerstädtischer Lage bei gleichzeitiger Re-

duktion der Umweltwirkungen zur Einhaltung der Grenzwerte der Klimaschutzpolitik [6] ein Spannungsfeld, da ressourceneffizientes Bauen häufig mit höheren Investitionskosten verbunden ist und daher als potenziell verzögernder Faktor wahrgenommen wird [7].

Im durch die Baden-Württemberg Stiftung geförderten Forschungsprojekt „NaBau-5 Holz R³“ wurden daher experimentelle Holzleichtbaukonzepte für die städtische Nachverdichtung weiterentwickelt. Dabei wurden digitale Planungswerkzeuge, robotische Fertigungsverfahren und integrierte Lebenszyklusanalysen in einem integralen Design-to-Production-Prozess zusammengeführt. Parallel wurde im Rahmen des von der DFG geförderten Forschungsvorhabens SFB TRR 141: „Biological Design and Integrative Structures – Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ ein bioinspirierter Ansatz zum Design von ultraleichten segmentierten Holzschalentragwerken entwickelt. Basierend auf den dort gewonnenen Erkenntnissen wurden am Beispiel einer neuentwickelten, robotisch gefertigten Holzschalenkonstruktion aus dem Forschungsprojekt „NaBau-5 Holz R³“ die Implikationen einer Wieder- bzw. Weiterverwendung am Lebensende untersucht und das Potenzial in Bezug auf die Umweltwirkungen dargestellt. Die Umweltwirkungen dieser Holzschalenkonstruktion wurden in Szenarien anhand der genormten Methode der Ökobilanz (LCA) untersucht [8–10]. Um der Komplexität temporärer Gebäude als potenziellem Anwendungsfeld Rechnung zu tragen, wird eine probabilistische Analyse auf Basis dynamischer Ökobilanzdaten durchgeführt. Noch unbekannt und unsichere Nutzungszyklen zu Beginn des Lebenszyklus wurden in Form einer Monte-Carlo-Simulation abgebildet [11].

Diese Publikation widmet sich in Abschn. 2 zunächst der Darstellung kaskadierter, biobasierter Systeme in der Ökobilanz und stellt bestehende methodische Herausforderungen dar. Abschn. 3 beschreibt das verwendete Anwendungsbeispiel der Holzschalenkonstruktion aus technischer Sicht zur Untersuchung der Lebensende-Optionen. Die Methodik zur Ökobilanz sowie zur lebenszyklusübergreifenden Analyse wird in Abschn. 4 auf Grundlage des Ziels und des Untersuchungsrahmens erläutert. In Abschn. 5 wird die entwickelte Methode anhand des ausgewählten Anwendungsbeispiels durchgeführt und die Ergebnisse auf Grundlage einer klassischen Ökobilanz (unter Berücksichtigung des Lebenszyklus) den Ergebnissen auf Grundlage der probabilistischen Ökobilanz (hier wird die Unsicherheit der zukünftigen Nutzungen berücksichtigt) gegenübergestellt. Abschn. 6 diskutiert die gewonnenen Ergebnisse und die Anwendbarkeit der gewählten Methodik, fasst abschließend die Erkenntnisse der vorliegenden Analyse zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Anwendungsfelder und methodische Erweiterungen.

2 Kaskadennutzung und Wiederverwendung biobasierter Rohstoffe in der Ökobilanz

Kaskadennutzung und Wiederverwendung, insbesondere von biobasierten Rohstoffen, sind innerhalb der Ökobilanz interessante methodische Fragestellungen, deren konsistente Berücksichtigung den Rahmen der bisherigen Standardwerke übersteigt. Zwar existieren Ansätze, die sich mit den Themen „Allokation“ und „Systemraumerweite-

rung“ beschäftigen, jedoch wird die damit verknüpfte notwendige Frage der Zyklenzahl einer Kaskadennutzung oder Wiederverwendung nicht gemeinsam adressiert [12].

2.1 Zuordnung von Umweltwirkungen bei biobasierten Rohstoffen

Grundsätzlich ist die Frage der Abbildung von Kaskadennutzung und Wiederverwendung eng verknüpft damit, wie man Umweltwirkungen auf mehrere Koppelprodukte aufteilt (Allokation). In beiden Fällen müssen Umweltwirkungen entweder – wie bei der Kaskadennutzung und Wiederverwendung – auf mehrere Nutzungszyklen oder – wie bei Koppelprodukten – auf mehrere Produkte aufgeteilt werden. Aufgrund dessen werden nachfolgend verschiedene, bestehende Ansätze zum Aufteilen von Umweltwirkungen dargestellt. Die Methodik der Ökobilanzierung bietet nach ISO 14044 grundsätzlich mehrere Möglichkeiten, dieses Zuordnungsproblem zu lösen. Sie werden im ILCD-Handbuch weiter spezifiziert und detailliert [9, 13, 14]:

- Möglichkeit 1: Aufteilung in Teilprozesse,
- Möglichkeit 2: Systemraumerweiterung,
- Möglichkeit 3: physikalische Allokation (z. B. Masse, Energie) und
- Möglichkeit 4: nicht-physikalische Allokation (z. B. Kosten).

Die Aufteilung des Prozesses in Teilprozesse, um eine Allokation zu vermeiden, ist der zu bevorzugende Weg. Sie bietet den Vorteil, dass hier die Produkte und die entsprechenden Emissionen den Einzelprozessen genau zugeordnet werden können. In der Realität finden sich jedoch häufig Prozesse mit zwei oder mehreren Produkten, bei denen eine Aufteilung in Einzelprozesse nicht möglich ist. An dieser Stelle muss über eine Systemraumerweiterung nachgedacht werden. Die Systemraumerweiterung ist allerdings nur anwendbar, wenn Umweltinformationen (Datensätze) zur Verfügung stehen, welche die Bereitstellung aller nicht im betrachteten Produktsystem verwendeten Koppelprodukte repräsentieren. Diese Voraussetzung ist nur selten erfüllt. In diesem Fall empfehlen die einschlägigen Normen zunächst eine Allokation über physikalische Beziehungen (z. B. nach Energiegehalt oder Masse); wenn dies auch nicht möglich ist, eine Allokation über nicht-physikalische Beziehungen wie den Marktwert. In Bezug auf biobasierte Rohstoffe und insbesondere Holzprodukte ist die Methode der Systemraumerweiterung die bevorzugte Lösung. Sie kann Probleme wie nicht geschlossene Kohlenstoffbilanzen oder Massendefekte vermeiden, die vor allem bei nicht-physikalischer Allokation auftreten [15, 16].

Lebenszyklusübergreifende Szenarien wie Kaskadennutzung und Wiederverwendung selbst spielen bei der Betrachtung der Umweltwirkungen von Baumaterialien basierend auf nachwachsenden Ressourcen eine entscheidende Rolle. Können ganze Baukonstruktionen nach dem ersten Nutzungszyklus wiederverwendet werden oder Baumaterialien weiterverwendet werden (Kaskadennutzung), verteilen sich die Umweltwirkungen der Lebenszyklusphasen Herstellung und Lebensende auf mehrere potenzielle Nutzungszyklen. Ein allgemein gültiger Ansatz für die Berücksichtigung von Kaskadennutzung bzw. mehrerer Nutzungszyklen existiert bisher allerdings nicht [17]. Auch Nachhal-

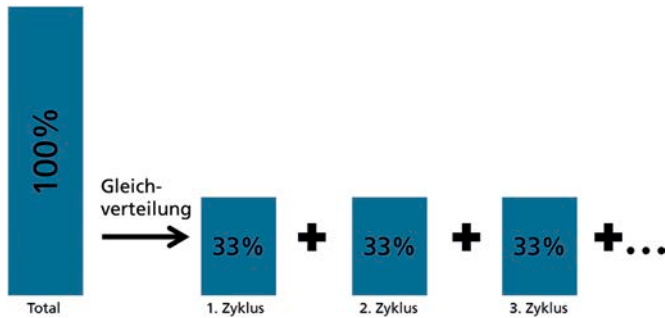


Bild 1. Schema der Verteilung von Umweltwirkungen auf mehrere Zyklen durch Gleichverteilung

Fig. 1. Schematic depiction of the allocation of environmental impacts to several life cycles through equal distribution

tigkeitsbewertungssysteme wie DGNB und BNB definieren ausschließlich ein standardmäßig zu verwendendes Lebensende [18, 19]. Damit können die Vorteile der Wieder- bzw. Weiterverwendung nicht adressiert werden. Um diese auch ökobilanziell zeigen zu können, muss ein methodischer Ansatz entwickelt werden, der die Aufteilung der Umweltemissionen auf mehrere Nutzungszyklen regelt und dabei eine unbekannt Anzahl maximaler Nutzungszyklen berücksichtigt. Ergänzend zu den bereits aufgeführten Möglichkeiten der Allokation schlagen die Autoren daher drei weitere Ansätze bzw. Ausgestaltungen vor:

- Möglichkeit 5: Gleichverteilungs-Ansatz,
- Möglichkeit 6: Cut-off-Ansatz und
- Möglichkeit 7: Allokation nach Verursacherprinzip.

Beim Gleichverteilungs-Ansatz werden die Lasten über die gesamte Kaskade bzw. Nutzungszyklen linear verteilt (Bild 1). Dieses Vorgehen ist nach DIN EN ISO 14040/14044 [8, 9] zulässig und entspricht der im ILCD-Handbuch [13, 20] aufgeführten Allokation von Umweltwirkungen auf Basis physikalischer Beziehungen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Anzahl der Nutzungszyklen und die Art der Nutzung bekannt sind. Unbekannte Nutzungszyklen können nicht adressiert werden. Ferner widerspricht der Gleichverteilungs-Ansatz dem Verursacherprinzip [21], der entscheidenden Grundwertehaltung innerhalb der Ökobilanz. Derjenige, der die Umweltwirkungen verursacht, soll den Hauptanteil tragen.

Beim Cut-off-Ansatz werden die Nutzungszyklen voneinander getrennt betrachtet. Die erste Stufe der Kaskade (bzw. der erste Nutzungszyklus) erhält die Gutschrift, beispielsweise aus der Einbindung des Kohlenstoffs. Die mittleren Stufen der Kaskade (bzw. die mittleren Nutzungszyklen) werden als kohlenstoffneutral angesehen. Die letzte Stufe der Kaskade (bzw. der letzte Nutzungszyklus) trägt die Emissionen des biogenen Kohlenstoffs.

Alternativ können die Umweltwirkungen anhand des ökonomischen Restwertes aus Perspektive des Gebäudeeigentümers als Allokationsschlüssel verteilt werden. Diese ökonomische Allokation entspricht DIN EN ISO 14040/14044 und den Festlegungen des ILCD-Handbuches. Bei diesem Ansatz wird dem Verursacherprinzip Rechnung getragen, da derjenige, der am meisten von dem Produkt profitiert, den größten Teil der Umweltwirkungen zu tragen hat. Außerdem wird der Unsicherheit späterer Nut-

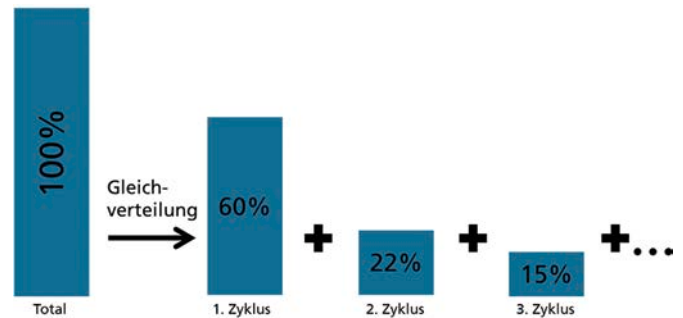


Bild 2. Schema der beispielhaften Verteilung von Umweltwirkungen auf mehrere Zyklen durch ökonomische Allokation

Fig. 2. Schematic depiction of the allocation of environmental impacts to several life cycles through economic allocation

zungszyklen Rechnung getragen, da potenziell mögliche, aber nicht sicherzustellende zukünftige Nutzungszyklen geringere Umweltlasten tragen als der sichere, da bekannte, erste Nutzungszyklus. Insgesamt trägt so der erste Nutzungszyklus die größten Umweltwirkungen (Bild 2).

2.2 Berücksichtigung der Kohlenstoff-Speicherung in biobasierten Rohstoffen

Neben der Aufteilung von Umweltwirkungen spielt die Kohlenstoff-Speicherung eine große Rolle für die ökologische Betrachtung biobasierter Rohstoffe. Allgemein kann die Einbindung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre in biobasierte Produkte die strahlungsantreibende Wirkung verzögern und dadurch zeitweise aktuelle anthropogen verursachte Emissionen ausgleichen [12]. Dies wird als Anlass gesehen, die Kohlenstoff-Emissionen von biobasierten Produkten mit langer Lebensdauer mit einem Abzinsungsfaktor zu versehen. Einige Regelwerke und wissenschaftliche Leitfäden, beispielsweise das ILCD-Handbuch und Levasseur et al., eröffnen die Möglichkeit einer Abzinsung von Umweltwirkungen über die Zeit [13, 22]. Diese führt offensichtlich zu einer rechnerischen Reduzierung der Emissionen eines Systems mit langlebigen biobasierten Produkten. Aufgrund der Abzinsung kann die Kohlenstoff- sowie die Massenbilanz des so betrachteten Systems nicht mehr geschlossen werden. Als Resultat lassen sich die Emissionen ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr oder nicht mehr korrekt berücksichtigen. Weiterhin ist der Abzinsungsfaktor bisher nicht wissenschaftlich belastbar zu bestimmen. Im ILCD-Handbuch wird bei einer Produktlebensdauer von 100 Jahren eine Abzinsung von 1% pro Jahr angesetzt. In anderen Quellen beispielsweise Groneman et al. werden auch weitaus höhere Abzinsungen vertreten und, ähnlich wie bei einer ökonomischen Diskontierung, die Zeitpräferenz mit in die Bewertung einbezogen [23]. Nachteil dieser Betrachtung ist eine implizierte Bewertung bereits in den Ökobilanzgrößen, wie beispielsweise dem Treibhauspotenzial. Damit einher gehen eine Intransparenz der Ergebnisse und fehlende Vergleichbarkeit.

3 Technische Beschreibung des Anwendungsbeispiels

In dieser Studie wird ein im Rahmen des Forschungsprojekts „NaBau-5 Holz R³“ entwickeltes modulares Holzbau-

system untersucht. Die der Untersuchung zugrunde liegende Konstruktion basiert auf einem digital gesteuerten Produktionsverfahren für materialeffiziente und strukturell leistungsfähige Holzplattenkonstruktionen [24, 25]. Das Konstruktionssystem besteht aus modularen, hohlen Buchensperrholz-Kassettenbauteilen mit Keilzinkenverbindungen zusammen und baut auf einer Reihe von Forschungsprojekten auf, die von den beteiligten Instituten in den letzten Jahren durchgeführt wurden [24]. Innerhalb des Forschungsprojekts „NaBau-5 Holz R⁵“ wurden auch andere Ansätze zur Konstruktion mit segmentierten Holzschalen untersucht. Die vorliegende Studie konzentriert sich allerdings auf die Kassettenkonstruktion, da diese sowohl ökologische und ökonomische als auch hinsichtlich Wiederverwendbarkeit wesentliche Vorteile bietet. Aspekte der digitalen, integrierten und robotischen Fertigung dieses Konstruktionsansatzes werden im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt.

Die ökobilanziell untersuchten Kassetten bestehen aus je zwei Buchensperrholz-Platten, zwischen denen Randbalken des gleichen Materials verleimt sind (Bild 3). Die daraus resultierende Sandwichkonstruktion ist daher hohl. Als Verbindungselement zwischen den Kassetten fungiert eine Kombination aus Keilzinken und Bolzen. Die bodenseitig angeordnete Platte weist eine große Öffnung auf, um den Zugang zu den Schraubverbindungen der Kasette innenseitig zu ermöglichen. Zur Gewichtseinsparung können die Abmessungen der Kassettenelemente an die lokal auftretenden Kräfte angepasst werden.

Der Herstellungsprozess dieser Kassettenplatten unterteilt sich in einen umfangreichen Additivprozess und einen anschließenden Subtraktionsprozess. Die hohe Anzahl der einzelnen Bauelemente und deren geforderte Präzision erfordern einen automatisierten, robotergestützten Vorfertigungsprozess, der in einem integrativen Design-to-Production-Prozess umgesetzt wurde. Im Vorfertigungsprozess wird ein Teil des Produktionsprozesses vor der Roboterfertigung unter Verwendung traditioneller Holzbearbeitungsmaschinen durchgeführt. Diese Vorverarbeitung besteht im Formatieren der Platten in eine Polygoneometrie und Ablängen von Sperrholzträgern. Der robotische

Prozess konzentriert sich auf die komplexeren Fertigungsschritte wie Montieren, Kleben und Fräsen. Dazu nimmt ein Industrieroboter für jede Kante einer Platte die Träger mit einem vorgegebenen Querschnitt auf und fährt sie über eine stationäre Tischsäge, um ihre Enden in einem bestimmten Winkel zu schneiden. Danach wird der Leim aufgetragen und die Balken werden auf der zugehörigen Platte befestigt, die zuvor vom selben Roboter auf einen Drehtisch gelegt wurde. Nach der Montage erfolgt die dauerhafte Kaschierung zwischen Platten und Trägern mit einer stationären Presse, danach wird die montierte Rohkasette wieder auf dem Drehtisch für den Fräsvorgang montiert. In diesem letzten, subtraktiven Fertigungsschritt werden die Verbindungsdetails durch Roboterfräsen hergestellt. Dazu gehören das maß- und winkelgenaue Schneiden der Segmentkanten, das Fräsen der Keilzinken und das Bohren von Löchern für die Schraubverbindungen.

Da das untersuchte Holzschalensystem auf reversiblen formschlüssigen Verbindungen wie Schrauben und Fingerzinken basiert, kann die Tragschale vollständig rückgebaut werden. Falls die Qualität der Module noch den notwendigen technischen Anforderungen entspricht, können sie an anderer Stelle mit gleicher Geometrie wieder aufgebaut und so als wiederverwendbares Gebäudeelement genutzt werden. Dies stellt die hochwertigste Form der Nutzung dar, ist jedoch stark vom entsprechenden Anwendungsfall abhängig. Da die Geometrie der Anschlüsse maßgeblich für die Gestaltung der Hülle ist, kommt es für jede Tragschale zu spezifischen Mustern mit jeweils abgestimmten Einzelelementen. Aufgrund dieser spezifischen Geometrie können die Elemente nicht beliebig, sondern nur bei ähnlichen geometrischen Randbedingungen weitergenutzt werden. Je stärker die vorherige Geometrie von der Folgegeometrie abweicht, desto mehr Elemente müssen neu produziert werden.

4 Methodische Grundlagen

Die in Abschn. 2 erläuterten Ansätze zur Ermittlung bzw. Verteilung der Umweltwirkungen von temporärem Holzbau

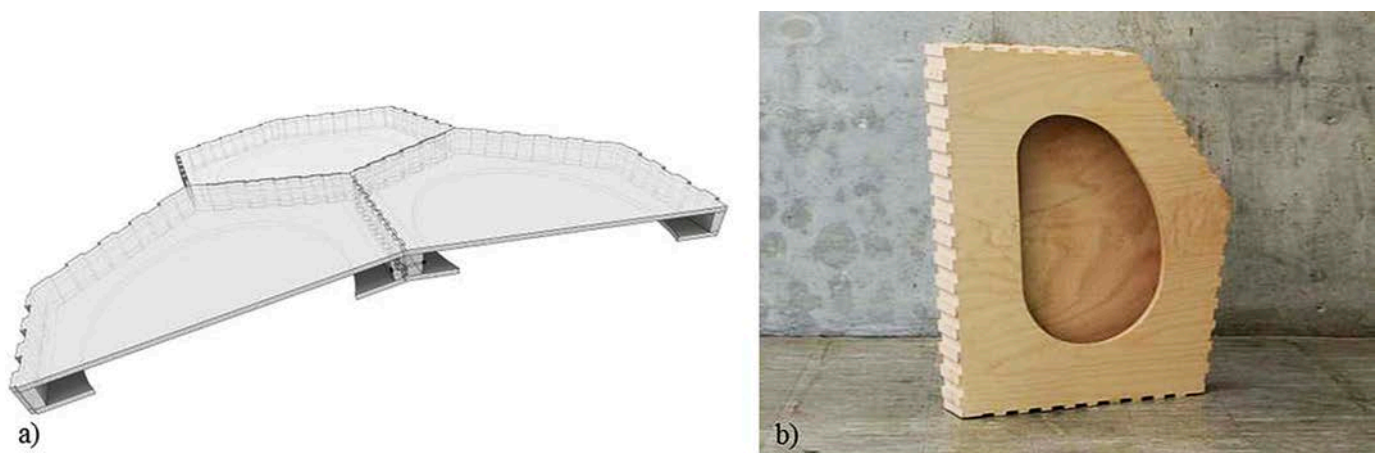


Bild 3. a) Das Hohlkassettensystem mit Keilzinkenverbindungen sowie Schraubverbindungen im dreidimensionalen Schnitt. Die Bodenplatten haben eine große Öffnung. b) Fertiger Prototyp aus Buchensperrholzplatten mit einer Dicke von 21 mm und Buchensperrholz-Kantenbalken mit einer Dicke von 80 mm, bei einer Gesamtdicke von 122 mm [24].

Fig. 3. a) The hollow cassette system with finger-joints and screws in three-dimensional section. The base plates have a large opening. b) The finished prototype is made of 21 mm thick beech plywood panels and 80 mm thick beech plywood edge beams with a total thickness of 122 mm [24].

werden hier in Form einer probabilistischen Analyse unter ökonomischen Rahmenbedingungen dargestellt. Grundlage der Berechnung ist ein dynamisches Ökobilanzmodell. Es wird unter der Annahme zufallsverteilter Lebensende-Optionen innerhalb des gesamten Betrachtungszeitraums abgebildet. Es werden zunächst die Rahmenbedingungen für das Ökobilanz-Modell ausgeführt. Anschließend werden die Randbedingungen und Annahmen für die Betrachtung der Lebensende-Optionen erläutert.

4.1 Rahmenbedingungen des Ökobilanz-Modells

Um den Einfluss verschiedener Lebensende-Szenarien (EOL-Szenarien) der Holschalenskonstruktion auf ihre Umweltwirkungen behandeln zu können, wird zunächst das Ökobilanz-Modell unter Berücksichtigung des Lebenszyklus dargestellt. Damit die Flexibilität der Nutzungszyklen eingehen kann, beruht das Modell auf modularen, zeitlich aufgelösten Daten. Jede der untersuchten Lebenszyklusphasen wird daher in jedem der untersuchten Zeitschritte analysiert und innerhalb der Betrachtungszeit in Form von Umweltprofilen dargestellt. Die der Modellierung zugrunde liegenden Inventardaten basieren auf Projektergebnissen des Forschungsprojekts „NaBau Holz R³“ [24], die Annahmen der dynamischen Datensätze (Strom und Mobilität) basieren auf den Szenarien des EU Reference Scenario 2016 [27]. Tabelle 1 stellt die wichtigsten Festlegungen und Randbedingungen zusammen.

Bild 4 zeigt schematisch das betrachtete System mit seinen jeweiligen Nutzungszyklen in lebenszyklus-übergreifender Darstellung. Als System ist dabei die zur Bereitstellung von 1 m² überspannter Raum und Jahr erforderliche Konstruktion, betrachtet über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren, definiert. Für jeden Lebenszyklus werden dabei die Systemgrenzen und Lebenszyklusphasen gemäß Tabelle 1 berücksichtigt. Auf Grundlage verschiedener EOL-

Szenarien können verschiedene Untersuchungen berücksichtigt werden. Im Szenario 1 wird ein klassisches Lebensende ohne Wiederverwendung angenommen. Dabei wird die gesamte Schalenskonstruktion einer energetischen Verwertung zugeführt. Bei der Verbrennung wird das biogene CO₂ freigesetzt und sowohl thermische als auch elektrische Energie gewonnen. Diese Energien werden ins Netz eingespeist und über eine Gutschrift mit dem prognostizierten Energiemix des jeweiligen Jahres versehen. Szenario 2 betrachtet die Wiederverwendung der Konstruktion an anderem Ort. Dabei wird die gesamte bewitterte Schicht ausgetauscht. Nur die Tragschicht, bestehend aus Kassetten, Schrauben und Dämmung, kann wiederverwendet werden. Dabei wird ein Materialverlust durch veränderte geometrische Bedingungen von ca. 10% zusätzlich zum Verlust in der Plattenherstellung angenommen.

4.2 Modellierung der Zyklenzahl

Die größten Unsicherheiten bei der Lebenszyklusbetrachtung temporärer Gebäude sind die Dauer der jeweiligen Nutzungszyklen sowie die Art der Nachnutzung. Um diese Unsicherheiten abbilden zu können, wurde eine Monte-Carlo-Analyse zur Abschätzung der jeweiligen Nutzungsdauer durchgeführt. Diese Analyse wurde mit einer Abschätzung der Weiterverwendung anhand des ökonomischen Restwerts gekoppelt. Da die maximale Zyklenzahl nicht durch technische Rahmenbedingungen definiert werden kann, werden – ähnlich wie bei biologischen Systemen – die Materialien solange wieder- bzw. weiterverwendet, bis der notwendige Aufwand den möglichen Nutzen übersteigt [28]. Dieses Konzept wird auf die Betrachtung übertragen. Dabei werden ökonomische Prinzipien als Triebfeder wirtschaftlicher Prozesse vorausgesetzt. Die Modellierung unterscheidet zwischen der Anzahl an Nutzungszyklen und der Anzahl an Lebenszyklen. Der Le-

Tabelle 1. Rahmenbedingungen des Ökobilanz-Modells

Table. 1. Scope of the LCA model

Rahmenbedingung Ökobilanz	Festlegung
Ziel der Studie	Einfluss verschiedener EOL-Szenarien der Holzschalenkonstruktion hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen bestimmen
Untersuchungsgegenstand	Segmentierte Holzschalenkonstruktion am Beispiel einer 991 m ² großen und 918 m ² überspannenden Hallenkonstruktion mit einer maximalen Spannweite von ca. 25 m
Funktionales Äquivalent	1 m ² überspannter Raum und Jahr
Betrachtungszeitraum	Aufgrund des einfachen und kostengünstigen Auf- und Abbaus der Holzschalenkonstruktion kann flexibel auf aktuelle Bedarfe reagiert werden. Aufgrund dessen wird der Betrachtungszeitraum auf die Dauer von 50 Jahren bei beliebiger Anzahl an Umnutzungen festgelegt.
Systemgrenze	Für die Studie werden in Anlehnung an [26] und [27] die Lebenszyklusphasen „A1–A3“ (Herstellungsphase inkl. Transporte bis zum Werk), „A4“ (Transport zur Baustelle), „A5“ (Errichtung) und je nach EOL-Szenario „C1“ (Abbau), „C2“ (Transport), „C3“ (Abfallbehandlung), „C4“ (Beseitigung) und „D“ (Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze) betrachtet. Der Energiebedarf während der Nutzungsphase (B6) sowie andere Lebenszyklusphasen bleiben außerhalb der Betrachtung.
Betrachtete Wirkkategorien	Aufgrund der gesellschaftlichen Relevanz wird für die hier gewählte Darstellung die Umweltkategorie „Treibhauspotenzial“ (GWP) untersucht. Die Betrachtung des GWP ist auch deshalb notwendig, weil die Einbindung von biogenem CO ₂ berücksichtigt werden soll.
Weitere Annahmen	Die Einbindung von biogenem CO ₂ wird in der vorliegenden Studie nicht diskontiert berücksichtigt. Dies entspricht der in der Arbeitsgruppe GaBi entwickelnden Vorgehensweise zur Bilanzierung biogener Rohstoffe [12].

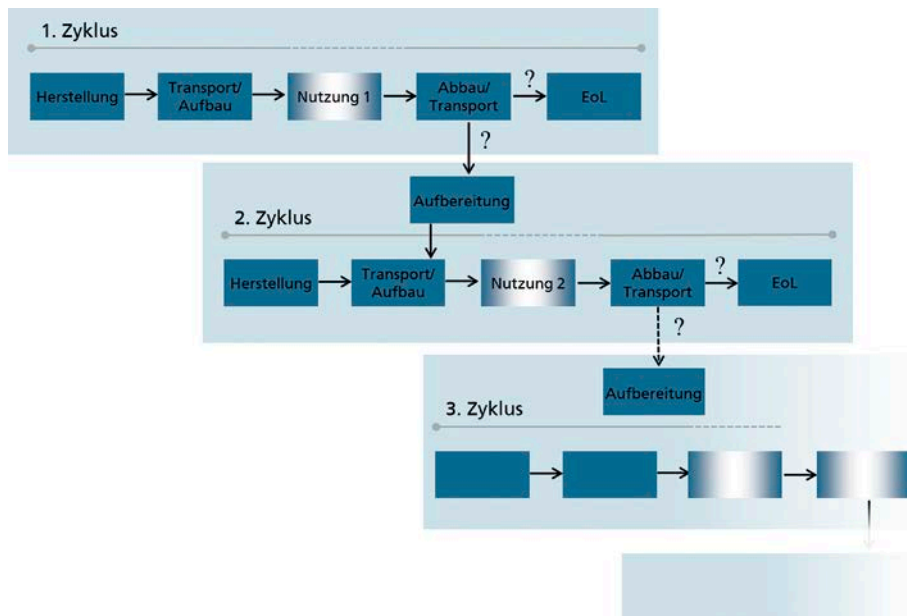


Bild 4. Schema der Zyklen innerhalb der Betrachtungszeit. Dabei ist durch das Ökobilanzmodell nicht festgelegt, wie lange die jeweilige Nutzungsphase dauert. Am Ende jeder Nutzungsphase werden unterschiedliche Optionen dargestellt, die unter definierten Randbedingungen eintreffen.

Fig. 4. Scheme of life cycles within the investigated time period. The life cycle assessment model does not determine how long the respective use phase lasts. At the end of each utilisation phase, different options are presented which occur under defined boundary conditions.

benszyklus bezieht sich auf die Herstellung sowie die Entsorgungsphase eines vollständigen Systems. Innerhalb eines Lebenszyklus können mehrere Nutzungszyklen anfallen, bei denen die Schale abgebaut und an anderer Stelle aufgebaut wird. Die maximale Anzahl der Nutzungszyklen wird durch Festlegung eines jährlichen Wertverlusts bestimmt. Der Restwert der Baukonstruktion oder des Baumaterials sinkt durch den Wertverlust pro Jahr stetig. Der Restwert ergibt sich aus der Differenz des noch zu erzielenden Marktpreises (nach Wertverlust) und den Kosten der Aufbereitung. Ist er positiv, lohnt sich die Aufbereitung der Module zur Wiederverwendung. Ist er negativ, ist eine weitere Verwendung ökonomisch nicht mehr sinnvoll und das Lebensende des Moduls erreicht (Bild 5).

Im Folgenden wird dieser methodische Ansatz zur Verteilung der Umweltwirkungen auf mehrere Nutzungszyklen für die Holzschalenbauweise angewandt. Dabei wird die Wiederverwendung der Holzkonstruktion für denselben Zweck, aber an einem anderen Standort untersucht. Hierbei werden die Aufwände für den Aufbau anhand der Energieverbräuche abgeschätzt, ebenso die Transportaufwände zum neuen Standort (Annahme: 100 km). Des Weiteren werden die Verluste (Annahme: 10%) der Holzkonstruktionen durch den Abbau und thermische Verwertung berücksichtigt. Die Anzahl der Wiederverwendungen wird über den Restwert berechnet. Um eine Bandbreite möglicher Ergebnisse darzustellen, stellt man die Anzahl der Umbauten über eine probabilis-

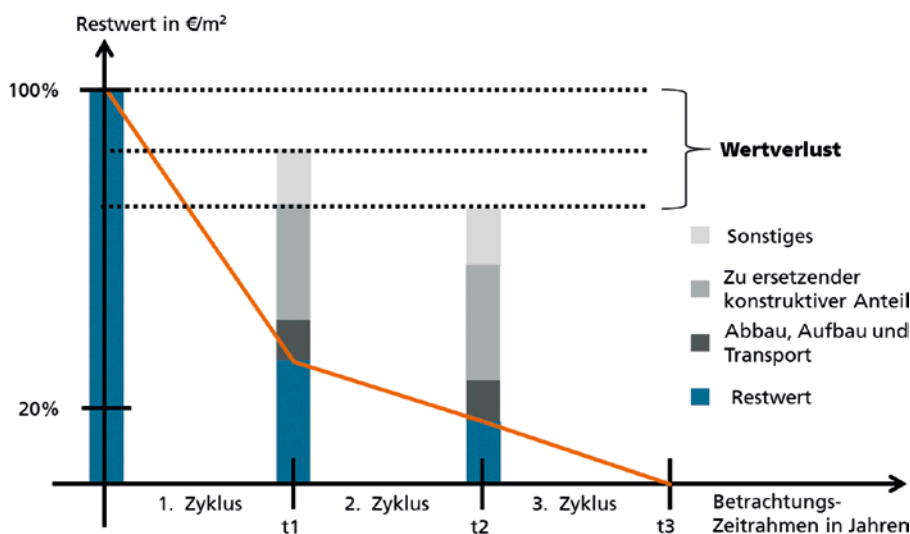


Bild 5. Schema des Restwertes der Baukonstruktion über mehrere Nutzungszyklen aus Eigentümerperspektive

Fig. 5. Scheme of the residual value of the building construction over several usage cycles from the owner's perspective

Tabelle 2. Dynamische Umweltprofile der segmentierten Holzschale über den Lebenszyklus, jeweils pro m² NGF und Jahr
 Table. 2. Dynamic environmental profiles of the segmented wooden shell during life cycle, per m² net floor area and year

GWP [kg CO ₂ -Äq./m ² · a]	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065
Neubau	-2,15	-2,13	-2,12	-2,17	-2,21	-2,24	-2,30	-2,35	-2,37	-2,38	-2,39
Ende Nutzungszyklus	0,08	0,07	0,06	0,10	0,13	0,15	0,19	0,23	0,25	0,26	0,26
Anfang Nutzungszyklus	-0,40	-0,39	-0,39	-0,40	-0,41	-0,41	-0,43	-0,43	-0,44	-0,44	-0,44
Ende Lebenszyklus	2,68	2,66	2,66	2,70	2,74	2,76	2,82	2,86	2,88	2,90	2,90

tische Szenarioanalyse mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation dar. Dabei wurden 2000 Simulationsläufe durchgeführt unter der Annahme, dass die Wahrscheinlichkeit einer Umnutzung nach 5 Jahren bei 40 % liegt und danach alle 5 Jahre um 5 % steigt. Für die Restwertermittlung wurde ein Grenzwert von 25 % des Neuwerts als geringster noch zur Wiederverwendung einsetzbarer Wert veranschlagt.

5 Ergebnisse

Dynamische, aggregierte Umweltprofile sind die Grundlage der probabilistischen LCA. Die aggregierten GWP-Umweltprofile aus Tabelle 2 dienen als Eingangsgrößen für die Simulation. Dabei werden jeweils die Werte des ermittelten Lebensende-Szenarios für die Betrachtung des Lebenszyklus ausgewählt und über die Betrachtungszeit von 50 Jahren addiert.

Die Berücksichtigung mehrerer Nutzungszyklen eines Produktsystems muss die Unsicherheit des Nutzerverhaltens einbeziehen, um die potenziellen Umweltwirkungen eines Systems belastbar bewerten zu können. Auf Basis der o. g. Rahmenbedingungen wurde eine Monte-Carlo-Analyse durchgeführt, um diesem Rechnung tragen zu können. Bild 6 zeigt die Ergebnisse für 2000 Berechnungen. Dabei wird sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit der jeweiligen Klassen als auch die kumulierte Wahrscheinlichkeit aller Berechnungen abgebildet. Die meisten Berechnungen ergaben dabei eine Umweltwirkung zwischen 0,6 und 0,8 kg CO₂-Äq. je m² NGF und Jahr. Darüber hinaus sind die Umweltwirkungen des Systems in 87% der untersuchten Fälle kleiner als 0,8 kg CO₂-Äq. je m² NGF.

Die Verteilung der Lebens- und Nutzungszyklen innerhalb der Analyse ist in Tabelle 3 dargestellt. Um die verschiedenen Lebensende-Szenarien unterscheiden zu können, wurde jeder Zyklus eindeutig zugeordnet. Bei anschließender Wiederverwendung wird der Zyklus den Nutzungszyklen, bei anschließender thermischer Verwertung oder Neubau den Lebenszyklen zugeordnet. Es wird ersichtlich, dass die beiden Lebensende-Szenarien ähnlich häufig Anwendung finden, wobei Nutzungszyklen etwas häufiger vorkommen.

Um die Auswirkung der beiden Lebensende-Szenarien detailliert zu betrachten, wurden die Ergebnisse nach Anzahl der Lebenszyklen sowie der Nutzungszyklen analysiert. Bild 7 zeigt die kumulierte Eintrittswahrscheinlichkeit der potenziellen Umweltwirkungen differenziert nach Anzahl der Lebenszyklen. Dabei wird ersichtlich, dass die Umweltwirkungen mit zunehmender Anzahl der Lebenszyklen steigen. Der Medianwert steigt dabei von 0,46 bei zwei Lebenszyklen auf 0,8 bei fünf Lebenszyklen.

In Bild 8 wurde das Ergebnis nach Anzahl der Nutzungszyklen differenziert dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass eine steigende Anzahl der Nutzungszyklen mit potenziell geringeren Umweltwirkungen verknüpft ist. Der Median sinkt dabei von 0,75 bei zwei Nutzungszyklen auf 0,45 bei vier sowie bei fünf Nutzungszyklen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Betrachtung temporärer, modularer Bauwerke aus biobasierten Rohstoffen wie Holz bedeutet bisher für die Ökobilanzierung eine methodische Herausforderung, die durch vorhandene Standards und wissenschaftliche Rahmenbedingungen nicht konsistent adressiert werden können. Durch die Integration probabilistischer und dynamischer Elemente konnte eine Methode entwickelt werden, die belastbare Ökobilanzergebnisse unter Berücksichtigung unsicherer Lebensende-Szenarien und verknüpfter Lebenszyklen für biobasierte Rohstoffe ermöglicht. Dabei wurde die

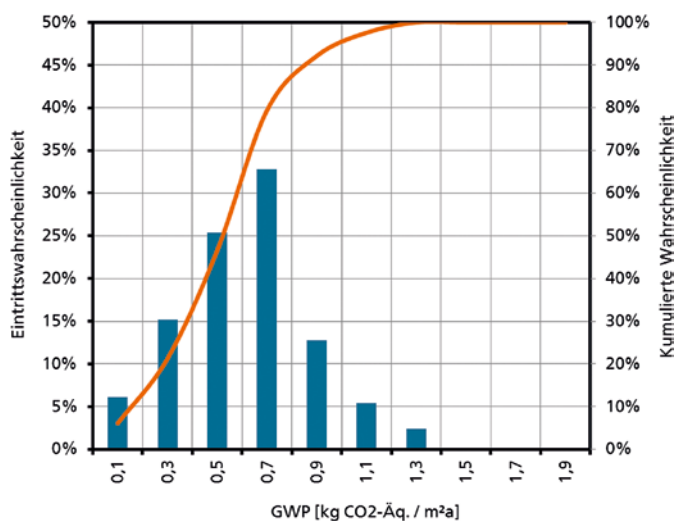


Bild 6. Eintrittswahrscheinlichkeit der Umweltwirkungen des betrachteten Systems über 50 Jahre Nutzungsdauer, Säulen: Anzahl der Berechnungsläufe in Histogrammform mit ermittelten Umweltwirkungen innerhalb der dargestellten Klassengrenzen, Kurve: kumulierte Wahrscheinlichkeit aller Berechnungen und damit die Wahrscheinlichkeit, mit der die Umweltwirkungen des Systems unter einem spezifischen GWP-Wert liegen.

Fig. 6. Probability of occurrence of the environmental impacts of the considered system during 50 years of service life, bars: number of calculation runs in histogram form with determined environmental impacts within the class boundaries, curve: cumulative probability of all calculations and thus the probability with which the environmental effects of the system are below a specific GWP value.

Tabelle 3. Verteilung der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation in Bezug auf die potenziellen Umweltwirkungen, die Anzahl der Lebenszyklen und der Nutzungszyklen
Table. 3. Distribution of the results of the Monte Carlo simulation in terms of potential environmental impacts, number of life cycles and of use cycles

	GWP [kg CO ₂ -Äq./m ² a]	Anzahl Lebenszyklen	Anzahl Nutzungszyklen
Min	0,134	1	1
Mean	0,614	2,66	2,94
Max	1,286	5	5

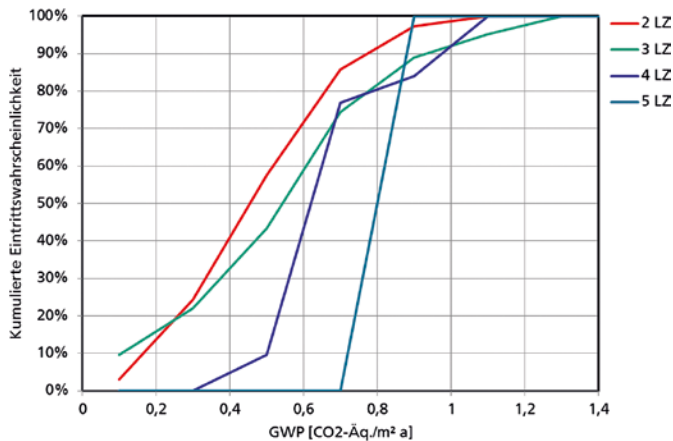


Bild 7. Kumulierte Eintrittswahrscheinlichkeit der potenziellen Umweltwirkungen, differenziert nach Anzahl der notwendigen Lebenszyklen.

Fig. 7. Cumulative probability of occurrence of potential environmental impacts, according to the number of necessary life cycles.

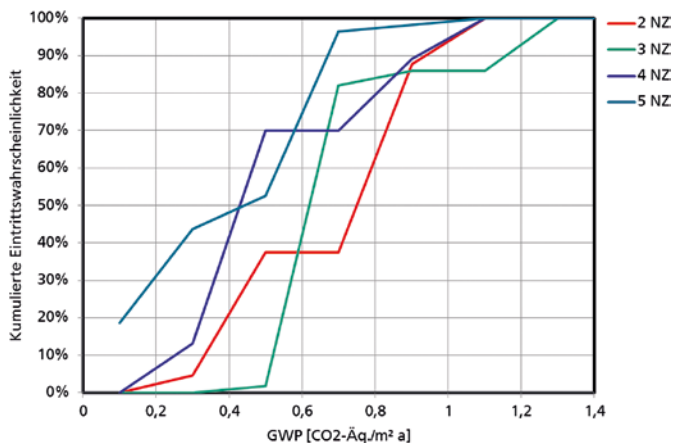


Bild 8. Kumulierte Eintrittswahrscheinlichkeit der potenziellen Umweltwirkungen, differenziert nach Anzahl der notwendigen Nutzungszyklen.

Fig. 8. Cumulative probability of occurrence of potential environmental impacts, according to the number of necessary use cycles.

Methode der ökonomischen Allokation im Sinne des Verursacherprinzips als Grundlage für die Wahl von Lebensende-Optionen gewählt. Die Methode wurde am Fallbeispiel einer temporären Leichtbauschalenskonstruktion auf

Basis eines modularen Holzbausystems angewendet und eine Analyse der potenziellen Umweltwirkungen am Beispiel GWP im Rahmen einer Monte-Carlo-Analyse unter Berücksichtigung der Unsicherheiten zukünftiger Nutzung durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich klare Vorteile bei hoher Anzahl an Umnutzungen gegenüber einer entsprechend hohen Zahl an Neubauten ergeben. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die potenziellen Umweltwirkungen der Konstruktion mit einer Wahrscheinlichkeit von 87% kleiner als 0,8 kg CO₂-Äq. je m² Nettogrundfläche und Jahr liegen.

Mit der hier exemplarisch dargestellten Methode steht ein adäquates Werkzeug zur Berücksichtigung von Nutzerentscheidungen im Lebenszyklus zur Verfügung. Damit ist die Methode ein Instrument zur konsistenten Bewertung der Umweltwirkung von Produktsystemen mit komplexen, mehrstufigen Nutzungsphasen. Um die vielfältigen Aspekte der Unsicherheit sowie eine bestmögliche Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen darstellen zu können, könnte die Methode insbesondere in Bezug auf die Schätzung von Lebensdauern sowie die Kopplung von detaillierteren Kostenmodellen ausgeweitet werden. Dabei könnten sowohl Lebensdauer-Schätzungen auf Weibull-Basis [29] als auch die Integration der Min-Max-Mean-Faktoren der Lebensdauerberechnung nach DIN 15686-8 integriert werden [30]. Des Weiteren könnten die möglichen Auswirkungen des Immobilienmarkts als aktive Entscheidungsgröße untersucht sowie potenziell integriert werden. Darüber ermöglicht es die Methode, die ökologischen Auswirkungen von Lebensende-Entscheidungen im Design-Prozess sowie bei Entscheidungen während der Nutzungsphase zu berücksichtigen.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten entstammen der gemeinsamen Arbeit in verschiedenen Projekten, wobei insbesondere durch die Projekte „NaBau-5 Holz R³“ und das durch die DFG geförderte Forschungsvorhaben SFB TRR 141: „Biological Design and Integrative Structures – Analysis, Simulation and Implementation in Architecture“ zentrale Vorarbeiten bereitgestellt wurden. Die Autoren danken den Projektkonsortien dieser Projekte sowie insbesondere Herrn Prof. Dr. Jan Knippers, Herrn Prof. Achim Menges sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Schew-Ram Mehra für die Projektleitung.

Literatur

- [1] Simons, H., Weiden, L., Braun, R., Thomschke, L., McGownd, E., Hamm, H.: Herausforderungen und Perspektiven für den deutschen Wohnungsmarkt. empirica ag. Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), 2017.
- [2] Henzelmann, T., Büchele, R., Engel, M.: „Nachhaltigkeit im Immobilienmanagement“. Roland Berger, 2010.
- [3] Baumert, K. A., Herzog, T., Pershing, J.: Navigating the numbers: Greenhouse gas data and international climate policy. Washington D.C.: World Resources Institute, 2005.
- [4] Gardiner & Theobald: Sustainable development in the construction industry, 2014.
- [5] IEA, International Energy Agency: Technology Roadmap Energy Efficient Building Envelopes. International Energy Agency (IEA), 2013.

- [6] UNFCCC: Paris Agreement: Adoption of the Paris Agreement. United Nations, 2015.
- [7] Vogdt, F. U., Kochendörfer, B., Dittmar, A.: Analyse und Vergleich energetischer Standards anhand eines exemplarischen Einfamilienhauses bzgl. Energiebedarf und Kosten über den Lebenszyklus. *Bauphysik* 32 (2010), H. 5, S. 319–326.
- [8] DIN EN ISO 14044:2006 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Berlin: Beuth, 2006.
- [9] DIN EN ISO 14040:2006 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin: Beuth, 2006.
- [10] Lasvaux, S., Gantner, J., Wittstock, B., Bazzana, M., Schioppa, N., Saunders, T., Gazulla, C., Mundy, J. A., Sjöström, C., Fullana-i-Palmer, P., Barrow-Williams, T., Braune, A., Anderson, J., Lenz, K., Takacs, Z., Hans, J., Chevalier, J.: Achieving consistency in life cycle assessment practice within the European construction sector: the role of the EeBGuide InfoHub. *Int J Life Cycle Assess* 19 (2014), H. 11, S. 1783–1793.
- [11] Gantner, J.: Wahrscheinlichkeitsbasierte Ökobilanzierung zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in zukünftigen Entscheidungen und Ereignissen. Dissertation. Universität Stuttgart; Institut für Bauphysik, 2017.
- [12] Beck, T., Albrecht, S., Lindner, J. P., Bos, U., Knüpfner, E.: Handlungsempfehlungen für Ökobilanzen biobasierter Produkte. Fraunhofer IBP, 2017.
- [13] ILCD handbook: General guide for life cycle assessment : detailed guidance. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.
- [14] Sala, S., Hiederer, R.: International reference life cycle data system (ILCD) handbook: General guide for life cycle assessment: provisions and action steps. Luxembourg: Publications Office, 2011.
- [15] Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., Richter, K.: Utilization of recovered wood in cascades versus utilization of primary wood – a comparison with life cycle assessment using system expansion. *Int J Life Cycle Assess* 19 (2014), H. 10, S. 1755–1766.
- [16] Jungmeier, G., Werner, F., Jarnehammar, A., Hohenthal, C., Richter, K.: Allocation in LCA of wood-based products experiences of cost action E9. *Int J Life Cycle Assess* 7 (2002), H. 6, S. 369–375.
- [17] Liptow, C., Lozanovski, A., Essel, R., Lindner, J. P., Held, M.: Erstellung von Handlungsempfehlungen für die Durchführung und Umsetzung von Ökobilanzen für die stoffliche Nutzung von Biomasse. nova Institut GmbH.
- [18] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude: Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015.
- [19] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen GmbH: DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau: Ökologische Qualität – ENV1.1/Ökobilanz des Gebäudes. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen GmbH, 2018.
- [20] ILCD: General guide for Life Cycle Assessment: Provisions and action steps. Luxembourg: Publications Office, 2010.
- [21] Klöpffer, W., Grahl, B.: Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [22] Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Samson, R.: Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology* 17 (2013), H. 1, S. 117–128.
- [23] Gronemann, S.: Nachhaltigkeit und Diskontierung. *ZfWU* 2 (2001), H. 2, S. 233–261.
- [24] Krieg, O. D., Schwinn, T., Menges, A.: Neue Holztechnologien: Robotisch gefertigter Leichtbau: Forstpavillon auf der Landesgartenschau Schwäbisch Gmünd 2014. *holztechnologie* 56 (2015), H. 2, S. 20–26.
- [25] Bechert, S., Groenewolt, A., Krieg, O. D., Menges, A., Knippers, J.: Structural Performance of Construction Systems for Segmented Timber Shell Structures. In: International Association for Shell and Spatial Structures (Hrsg.): IASS 2018 – Creativity in structural design, 2018, o. S.
- [26] Krieg, O. D., Bechert, S., Groenewolt, A., Horn, R., Knippers, J., Menges, A.: Affordances of complexity: Evaluation of a robotic production process for segmented timber shell structures. In: World Conference on Timber Engineering (Hrsg.): WCTE 2018 Proceedings, 2018, o. S.
- [27] Capros, P., Vita, A. de, Tasios, N., Siskos, P., Kannavou, M., Petropoulos, A., Evangelopoulou, S., Zampara, M.: EU Reference Scenario 2016: Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050. European Commission Directorate – General for Energy, Directorate – General for Climate Action and Directorate – General for Mobility and Transport, 2016.
- [28] Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; 91.010.99, 18.11.2014, <http://perinorm-fr.redi-bw.de/volltexte/CD21DE06/1865355/1865355.pdf>? Berlin: Beuth.
- [29] Gantner, J., et al.: EeBGuide Guidance Document Part B: Buildings. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2015.
- [30] Drack, M.: Bionik und Ecodesign: Untersuchung biogener Materialien im Hinblick auf Prinzipien, die für eine umweltgerechte Produktgestaltung nutzbar sind. Dissertation. Universität Wien, 2002.
- [31] Kara, S., Mazhar, M., Kaebnick, H., Ahmed, A.: Determining the Reuse Potential of Components Based on Life Cycle Data. *CIRP Annals* 54 (2005), H. 1, S. 1–4.
- [32] ISO 15686-8: 2008: Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 8: Reference service life and service-life estimation 91.040.01, 29.6.2018, <https://www.iso.org/standard/39070.html>. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2008.

Autoren dieses Beitrags

M.Sc. Rafael Horn, rafael.horn@ibp.fraunhofer.de
Dr.-Ing. Johannes Gantner, johannes.gantner@ibp.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi)
Wankelstraße 5
70563 Stuttgart

M.Sc. Abel Groenewolt, abel.groenewolt@icd.uni-stuttgart.de
Dipl.-Ing. Oliver David Krieg, oliver.krieg@icd.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart
Institut für computerbasiertes Entwerfen
Keplerstraße 11
70174 Stuttgart



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Stuttgart

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

Holzkirchen

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen
Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

www.ibp.fraunhofer.de